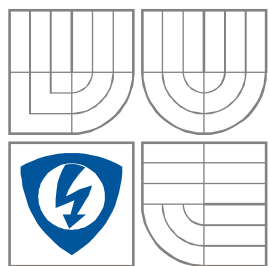




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NOVÉ OBLASTI APLIKACE ULTRAZVUKU V MIKROELEKTRONICKÝCH TECHNOLOGIÍCH

NEW AREAS OF THE ULTRASONIC APPLICATION IN MICROELECTRONICS
TECHNOLOGY

DISERTAČNÍ PRÁCE
DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Martin Buršík

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

BRNO, 2014

Abstrakt

Tato práce se zabývá depozicí speciálních tixotropních materiálů určených pro mikroelektronické technologie. Cílem práce je vývoj nové metody optimalizace dávkovacího procesu za účelem dosažení rozlišení tisku pod 100 μm . Práce obsahuje vývoj speciální dispensní hlavice (UZD) využívající působení ultrazvukové energie. Doložené výsledky dokumentují možnosti nově vyvinuté metody, která je schopna tisknout tixotropní materiály s rozlišením 65 μm . Oproti jiným metodám dosahuje těchto výsledků s běžně využívanými materiály pro tlustovrstvovou technologii s velikostí částic do 5 μm .

Klíčová slova

Ultrazvuk, nanášení, reologie, optimalizace, tisk, tlustovrstvová technologie.

Abstract

Doctoral thesis deals with the deposition of special thixotropic materials for microelectronic technology. The aim of the work is the development of the new method optimizing the dosing process in order to achieve a print resolution of better than 100 microns. The work includes the development of a special dispensing head (UZD) using the influence of ultrasonic energy. These results demonstrate the possibility of a newly developed method that is able to print thixotropic materials with a resolution of 65 microns. Compared to other methods achieves these results with the commonly used materials for thick film technology with particle size up to 5 microns.

Keywords

Ultrasonic, deposition, rheology, optimizing, print, thick film technology.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci na téma *Nové oblasti aplikace ultrazvuku v mikroelektronických technologiích* jsem vypracoval samostatně pod vedením školitele a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené disertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této disertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. října 2014

autor práce

Bibliografická citace

BURŠÍK, M. *Nové oblasti aplikace ultrazvuku v mikroelektronických technologiích*. Disertační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2014. 75 stran. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za metodické vedení práce, významnou podporu při zajištění přístrojového vybavení a materiálové základny pro tuto výzkumnou činnost a umožnění mých publikačních aktivit, účasti na konferencích i mezinárodních veletrzích.

Děkuji svým kolegům Ing. Jaroslavu Jankovskému a Ing. Michalu Řezníčkovi za cenné rady, které svým potenciálem mnohdy znatelně urychlily vývoj některých operací.

Děkuji také kolektivu Ústavu mikroelektroniky VUT v Brně, který mi poskytl podmínky k vypracování této práce a kde jsem nabyl svých studijních i profesních znalostí.

Závěrem děkuji rodině, která mi byla oporou v paralelně probíhajících povinnostech se studiem a umožnili mi tak soustředit se v potřebné míře na mé dlouhodobé studium.

Experimentální část této disertační práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072
Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
----------------	---------------

BGA	Typ pouzder pro povrchovou montáž Ball Grid Array – pouzdro s kuličkovými vývody
BNC	Typ konektoru
DPS	Deska Plošných Spojů
HIO	Hybridní Integrované Obvody
I/O	Vstupně / výstupní signály - Input / Output
M3	Metrický závit
NCE80	Materiál pro výrobu piezokeramik
OPA 445	Typ operačního zesilovače
SMD	Technologie povrchové montáže – Surface Mounting Technology
TLV	Tlustovrstvové technologie
UZ	Ultrazvuk
UZD	Speciální dispensní hlavice - označení vývojového stupně zařízení (Ultrazvukový dispenser / UZD1, UZD2, UZD3)
UMEL	Ústav mikroelektroniky, Vysoké učení technické v Brně
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Seznam symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
d	Piezoelektrická konstanta vztažená ke konkrétnímu materiálu	C/N
d_{in}	Vnitřní průměr kapiláry	μm
d_{min}	Minimální styčná plocha pasty	mm^2
E	Intenzita elektrického pole	kV/m
K	Tlaková citlivost dispenseru	-
l_1	Snížení hladiny v zásobníku dispenseru	mm
l_2	Posun pasty v transportní kapiláře	mm
l_{max}	Maximální vyosení toku pasty	mm
l_p	Poměrné prodloužení piezokeramického rezonátoru	m
l_{pR}	Poměrné prodloužení piezokeramického rezonátoru v rezonanci	m
l_{SR}	Poměrné prodloužení piezokeramického systému v rezonanci	m
η	Zdánlivá viskozita	Pa.s
$\varnothing 1$	Vnitřní průměr zásobníku dispenseru	mm
$\varnothing 2$	Vnitřní průměr transportní kapiláry	mm
\varnothing_{in}	Vnitřní průměr transportní kapiláry	μm
p	Tlak	Pa
$p_{limitní}$	Limitní tlak pro dostatečnou adhezi pasty	atm
$P_{limitní}$	Limitní výkon ultrazvukové jednotky	W
r_1	Poloměr zásobníku dispenseru	mm
r_2	Poloměr dávkovací kapiláry	mm
S_1	Vnitřní průřez zásobníku dispenseru	mm^2
S_2	Vnitřní průřez transportní kapiláry	mm^2
U	Budicí napětí	V_{p-p}
$+V_{budicí}$	Kladné budicí napětí	V
$-V_{budicí}$	Záporné budicí napětí	V
$v_{limitní}$	Limitní rychlost pro dostatečnou adhezi pasty	mm/s
V_s	Napájecí napětí operačního zesilovače	V

Obsah

1 Úvod	11
2 Současný stav a vymezení oblasti disertace	13
2.1 Vybrané nevakuové procesy pro depozici viskózních materiálů	13
2.1.1 Sítotisk	13
2.1.2 Jet dispensing	13
2.1.3 Dispensní tisk	13
2.2 Výběr konkrétní metody pro aplikaci přídavné ultrazvukové energie	14
2.3 Popis fází procesu depozice	14
2.4 Hlavní parametry dispensního tisku	16
2.4.1 Rozdělení parametrů dispensního procesu	16
2.4.2 Optimalizační parametry tisku	16
2.5 Cíle disertační práce	19
3 Výsledky disertační práce	20
3.1 Vlastní analýza řešení	21
3.1.1 Vliv ultrazvuku	21
3.1.2 Volba piezokeramických rezonátorů	22
3.1.3 Rezonanční frekvence / amplituda	23
3.1.4 Příprava pro vývoj UZD	23
3.1.5 Poptávka po technologii (tisk s vysokým rozlišením)	23
3.1.6 Technologické znalosti	23
3.2 Vytvoření pracoviště pro dispensní tisk	24
3.2.1 Polohovací zařízení Fisnar F4200N	24
3.2.2 Dávkovací jednotka	25
3.2.3 Výroba precizního držáku substrátů	26
3.2.4 Shrnutí kapitoly 3.2	26
3.3 Nová metoda dispensního tisku	26
3.4 Základní princip ultrazvukové jednotky UZD	27
3.4.1 Parametry procesu dispense s UZ podporou	27
3.4.2 Základní funkční bloky UZD	28
3.4.3 Znázornění funkce UZD hlavičky	28
3.4.4 Výpočet prodloužení piezokeramických rezonátorů	29
3.4.5 Model transportní kapiláry, simulace	30
3.5 Oblast působení vlivu UZ v transportní kapiláře	32
3.5.1 Adhezní podmínka	32
3.5.2 Shrnutí kapitol 3.3, 3.4 a 3.5.	35
3.6 První vývojový stupeň ultrazvukové jednotky – UZD1	35
3.6.1 Návrh modelu UZD1	35
3.6.2 Realizace UZD jednotky	35
3.6.3 Shrnutí dosažených výsledků s UZD1	37
3.7 Druhý vývojový stupeň ultrazvukové jednotky – UZD2	37
3.7.1 Návrh modelu UZD2	37
3.7.2 Realizace UZD2	38
3.7.3 Shrnutí dosažených výsledků UZD2	41

3.8 Třetí vývojový stupeň ultrazvukové jednotky – UZD3	41
3.8.1 Návrh modelu UZD3	41
3.8.2 Realizace UZD3	42
3.8.3 Shrnutí dosažených výsledků s UZD3	47
3.9 Tisk pasty s UZD3	47
3.10 Základní substrát keramika Al₂O₃, tloušťka 635 μm	49
3.10.1 Mechanické / geometrické vlastnosti substrátů	50
3.10.2 Úpravy tiskového procesu plynoucí z nerovnosti substrátu	51
3.10.3 Vývoj korekční jednotky pro optimalizaci trajektorie tiskové hlavice	51
3.10.4 Měření na profilometru	51
3.11 Rozlišení a parametrické vlastnosti UZ dispenseru	51
3.11.1 Dosažené parametry tisku	52
3.11.2 Fyzikální vlastnosti použitých past a jejich limitní rozlišení	52
3.11.3 Subrutiny pro optimalizaci tisku rohů motivu	53
3.12 Realizovaná ultrazvuková dispensní hlavice	55
3.12.1 Jednotlivé vývojové stupně ultrazvukové dispensní hlavice	55
3.12.2 Konstrukční uspořádání výsledného vývojového stupně	56
3.12.3 Rozpracovaný vývojový stupeň	56
3.13 Srovnání standardních systémů se systémem UZD	59
3.14 Vyhodnocení vlivu UZD systému na tisk tixotropních materiálů	60
3.15 Výsledky dosažené optimalizací dispensního tisku	61
3.15.1 Rekapitulace řešených problémů	61
3.15.2 Ukázky tiskových výsledků UZD3	62
3.16 Shrnutí výsledků doktorské práce	64
3.17 Patentování nové metody UZD dispense	67
4 Závěr	68
5 Literatura	70

1 Úvod

Současný vývoj mikroelektronických technologií je charakterizován novými materiály a procesy, u nichž však existují určité limity způsobené fyzikálními vlastnostmi používaných materiálů. Tyto hranice se týkají hodnot *mechanické pevnosti*, *elektrické vodivosti* a *transparentnosti*, ale také například *rychlosti rozpouštění*, *průtoku*, *viskozity* apod. Jednou z oblastí, kde je požadováno zlepšování rozlišení, je depozice viskózních materiálů nevakuovými metodami. Tato práce se zabývá novou metodou zaměřenou na zvýšení rozlišení s využitím *ultrazvuku* pro viskózní materiály. Proto studium účinků ultrazvuku ve zvolené oblasti tvoří výchozí část této práce. Obecně je z pohledu mikroelektroniky ultrazvuk využíván v mnoha směrech. Je to například pájení, mytí a sváření. V této práci je pozornost zaměřena na oblast depozice viskózních materiálů.

V mikroelektronice jsou pro depozici materiálů využívány různé metody. Nejčastější jsou sítotisk a šablonový tisk, dispensní tisk a jet dispensing. Tyto jsou aplikovány zejména pro nanášení pájecí nebo tlustovrstvové pasty, lepidla, tmelů a jiných materiálů s tixotropním chováním. Tixotropie je reologická vlastnost popisující dynamickou změnu viskozity během působení tlaku potažmo teploty a tření částic uvnitř materiálu. V mikroelektronických procesech nanášení tixotropních materiálů je stěžejní minimální objemové množství nanášeného materiálu, případně rozlišení konkrétní metody. Z tohoto důvodu je práce orientována na vývoj metody umožňující zvýšení rozlišení při nanášení tixotropních materiálů, kde jsou neustále kladeny požadavky na zvýšení hustoty integrace.

Působení ultrazvuku je obecně velmi úzce spjato s konstrukcí ultrazvukové jednotky, která v principu realizuje změnu elektrické energie z generátoru elektrického signálu na mechanické kmity piezokeramických elementů. Tyto jsou dále transponovány do různých typů deformace aktivních součástí ultrazvukových jednotek, jako je například ohyb membrány, redukce světlosti ventilu, pohyb elektrod apod. Mechanické kmity, které jsou výsledkem budicího signálu, lze soustředit s požadovaným výkonem do určených oblastí. Takto koncentrované mechanické kmity s frekvencí od jednotek KHz až po jednotky MHz lze využít v kombinaci s vhodným konstrukčním uspořádáním k velmi jemnému ovlivnění požadovaných parametrů s odlišnou fyzikální podstatou.

Ultrazvuk ve formě mechanických kmitů představuje velmi účinný způsob s dostatečnou selekcí pro lokalizaci jeho účinků. Ultrazvukový přenosový systém (akustický transformátor) působí jako *koncentrátor* a *vedení* mechanických kmitů k oblasti, v níž je požadováno ovlivnění určitého druhu energie. Vysvětlení účinků ultrazvukového působení v některých aplikacích lze demonstrovat na *čisticích procesech* v mikroelektronice. Podrobíme-li mycímu procesu DPS s vysokou hustotou integrace, nejsme schopni použitím běžných postřikových systémů, případně ponorných nádrží, mýt komponenty efektivně v reálných časech. Aplikace ultrazvuku v mycích procesech dokáže stísněné prostory na DPS „zpřístupnit“ narušením soudržnosti molekul mycího média. Tímto způsobem ovlivňuje viskózní silové účinky v objemu mycí kapaliny a dovoluje jí proniknout mezi *jednotlivé komponenty*, pod *čipy BGA*, *SMD součástky*, apod.

Dále typické procesy, kdy je ultrazvukové působení hlavním parametrem působícím v procesu. K demonstraci této funkce nám může posloužit proces *kontaktování ultrazvukem*. U tohoto procesu je ultrazvuk využíván pro samotné vytváření sváru.

Předmětem této práce je rozšíření oblasti aplikace ultrazvukových procesů do technologie *dispensního nanášení tixotropních materiálů*. Z hlediska zaměření pracoviště ústavu mikroelektroniky zabývajících se hybridními technologiemi je reologie materiálů perspektivní oblastí pro zde realizované tlustovrstvové procesy.

Vývoj optimalizace tisku tixotropních materiálů byl vyvolán snahou navýšit rozlišení tisku dispensní metodou z důvodu možnosti tisku nízkého počtu vzorků bez nutnosti tisku pomocí sítotiskového zařízení. Požadavkem bylo zefektivnit procesy vytváření vzorkového množství substrátů s rozlišovací schopností sítotiskového zařízení 200 μm . Z hlediska využití tlustovrstvových materiálů bylo možné využít stávajících znalostí reologického chování TLV past. Pro tlustovrstvové materiály byl postupně vyvinut ultrazvukový optimalizační princip, pomocí kterého je možné tisknout s rozlišením lepším než pomocí sítotisku (pod 100 μm). Tato metoda je určena přímo pro dávkování médií s viskositou ve stovkách Pa.s. Zároveň je však požadavkem na tisk motivu s vysokým rozlišením stanoven vnitřní průměr transportní kapiláry. Tato skutečnost protichůdně nutí zmenšovat průměr kapiláry a snahu o dávkování stejného média s co nejnižším tlakem. Z tohoto důvodu jsem pro optimalizaci procesu použil ultrazvukovou podporu redukující tření mezní vrstvy dávkovaného média uvnitř kapiláry. [1], [2], [3], [4], [5]

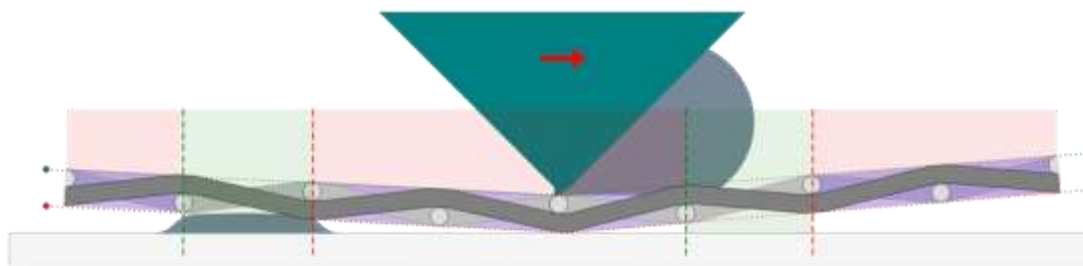
2 Současný stav a vymezení oblasti disertace

2.1 Vybrané nevakuové procesy pro depozici viskózních materiálů

Procesy pro nanášení viskózních materiálů jsou charakterizovány fyzikálním způsobem depozice dávkovaného média. Vybrané depoziční procesy, z nichž vychází technologie vyvinutá v rámci této disertační práce, principiálně rozdělují hlavní technologické fáze depozice.

2.1.1 Sítotisk

Sítotisk je první vybraný proces, který je charakteristický pro hybridní tlustovrstvovou technologii. Tato metoda představuje z hlediska reologických poměrů dávkovaného materiálu proces, během kterého pasta z výchozích hodnot viskozity, v okamžiku průchodu skrze síto právě pasírováním, redukuje svoji viskozitu a dochází tak k řídnutí a snazšímu přenosu požadovaného motivu na substrát. Obr. 2.1 zobrazuje proces nanášení, přičemž síto zde zastává funkci redukce viskozity. [1], [2], [6]



Obr. 2.1 Průběh nanášení pasty pomocí sítotisku, detail - těrka tiskne pastu skrz síto

2.1.2 Jet dispensing

Další metodou nanášení je *jet dispensing*. Ten je nasazován ve všech oblastech vyžadující specifické vlastnosti materiálů, které však dovolují malé částice v objemu pasty/inkoustu. Svým charakterem je tato metoda určena pro miniaturizaci a možnosti depozice materiálů do oblastí s hustou zástavbou. Metoda nachází uplatnění zejména při požadavku na vysoké rozlišení, kdy využívá inkousty s nanočásticemi apod. Metoda je schopna nanášet čáry od šířky řádově jednotky μm s nutností použití speciálních materiálů. Technologii *jet dispensingu* blíže specifikují uvedené publikace z konferencí. [1], [7], [8], [9], [10], [11], [12]

2.1.3 Dispensní tisk

Třetí metoda se parametricky řadí mezi tyto dvě rozdílné techniky nanášení a z každého procesu přejímá určité vlastnosti. Jedná se o metodu *dispensního tisku*, která je založena na aplikaci pasty z kartušového zásobníku skrze kapiláru na substrát s požadovaným výtlakem. Oproti výše uvedeným metodám je dispensní tisk schopen kombinovat dílčí parametry. Dispensní tisk umožňuje tisknout vrstvy o tloušťkách v řádu desítek μm , přičemž stejných parametrů je možné dosáhnout *sítotiskem*. Naopak *jet dispensing* poskytuje tisk velmi tenkých vrstev s vysokým rozlišením. Úkolem této práce je posunout možnosti dispensního tisku z důvodu požadavků na tisk

standardních materiálů s možnostmi vysokého rozlišení. Jedná se zejména o kombinaci vysokého rozlišení čára/mezera, kdy je dispensní tisk po optimalizaci schopen dosahovat šířky čáry pod 100 μm . Konkrétně se jedná o tisk pomocí pneumatického systému s optimalizační hlavou. [1], [2], [6], [11], [12], [13]

2.2 Výběr konkrétní metody pro aplikaci přídavné ultrazvukové energie

Vybrané depoziční procesy představují hlavní fyzikální principy pro nevakuovou depozici viskózních materiálů. Z jejich popisu a znalosti lze rozhodnout o vhodném principu, pro který bude znamenat přídavná ultrazvuková energie optimální prostředek pro dosažení lepších procesních parametrů.

Sítotisk prostřednictvím prostupu pasty sítím viskozitu redukuje v dostatečné míře a jeho hranice rozlišení závisí zejména na průměru drátů a následně světlosti použité síťoviny.

Metoda *Jet dispensing* je metoda využívající speciální materiály, s nimiž je možné dosahovat vrstev s vysokým rozlišením. Technologie *Jet dispensing* však pro vysoké rozlišení vyžaduje média s nízkou viskózitou, přičemž standardní TLV materiály nelze využívat bez speciálních úprav.

Disertační práce je zaměřena na aplikaci ultrazvukové energie, přičemž rozbořením fyzikálních principů jednotlivých procesů lze touto úpravou právě metodu *dispensního tisku* efektivně zoptimalizovat. Dispensní tisk je využíván pro depozici viskózních materiálů a ve spojení s tixotropním chováním lze tuto metodu hlouběji optimalizovat. V následující kapitole 2.3 je uveden přehled jednotlivých fází procesu depozice. Právě fáze *transportní* a *depoziční* je v procesu dispensního tisku stěžejní a vymezuje lokální působení přídavné energie do oblasti konce transportní kapiláry, jež mají rozhodující vliv na dosahované rozlišení. [1], [2], [6], [11], [12]

2.3 Popis fází procesu depozice

Disertační práce se věnuje působení přídavné ultrazvukové energie v samotném dispensním procesu, která je využívána pro optimalizaci tiskových parametrů. Pro dispensní tisk definují jednotlivé fáze procesu. V průběhu jednotlivých fází dávkovaný materiál reaguje svým reologickým chováním na procesní vlivy. Změny reologických parametrů jsou vlastností umožňující právě optimalizaci tiskového výstupu.

a) Plnicí fáze

Médium je v rámci dispensní metody plněno do zásobníků, které standardně mají vstupní/plnicí otvor s přírubou pro tlakové ústrojí a výstupní otvor s bajonetem pro fixaci výstupní kapiláry. Z hlediska reologie materiálu je při plnění známa viskozita materiálu, ta však z hlediska dávkování ještě neznamená, že materiál bude možné optimálně dávkovat. Z tohoto pohledu je podstatné tixotropní chování dávkovaného materiálu popisující změnu viskozity v závislosti na tlakových, potažmo třecích silách působících na materiál.

Během plnicí fáze je tedy podstatné zajistit temperování dávkovaného materiálu z důvodu dosažení počáteční viskozity.

b) Transportní fáze

V průběhu druhé fáze je dávkované médium transportováno z oblasti plnicí do oblasti depozice. K tomuto účelu slouží kapilára na výstupu ze zásobníku, která je definována použitým materiálem, délkou, tloušťkou stěny a hlavně samotným vnitřním průměrem. Transportní fáze představuje oblast, kde dochází k redukci viskozity mezní vrstvy, která je procesem vyžadována z důvodu oddělení požadovaného množství média a jeho průchodu skrz transportní kapiláru, v požadovaném čase a s požadovaným tvarem vrchlíku na výstupu z kapiláry.

Podstatnou skutečností je, že transportní fáze na základě tixotropních vlastností umožňuje zvyšovat rozlišovací schopnost dispensního tisku. *Zde je vliv aplikace ultrazvukové přídavné energie velmi podstatný.*

c) Depoziční fáze

Poslední možnost ovlivnění výstupu a finálního motivu na substrátu je prostřednictvím depoziční fáze, ta je však dávkovacím procesem velmi obtížně ovlivnitelná, proto je třeba zvolit optimální materiál z hlediska viskozity a jejího hysterezního chování z pohledu jejího růstu po fázi transportní.

Viskozita materiálu v průběhu jeho toku skrze kapiláru klesá a v okamžiku opuštění ústí kapiláry dochází k zastavení poklesu viskozity a po dosednutí na substrát začne viskozita se zpožděním opět růst a zamezí tak dlouhodobému roztékání nanášené pasty. Z důvodu kvality vytvořeného motivu, který bude co nejpřesněji kopírovat trajektorii pohybu dávkovací hlavičky, jsem aplikoval přídavnou ultrazvukovou energii v transportní kapiláře, kde co nejvíce redukuje viskozitu mezní vrstvy.

Depoziční fáze tedy aplikuje dávkovaný materiál s parametry, které jsou zajištěny z důvodu optimální depozice, a nadále již je materiál vystaven pouze změnám dynamické viskozity závislé zejména na jeho složení a teplotě okolí.

d) Leveling (fáze ustálení)

Tixotropní materiály se vyznačují hysterezním chováním viskozity a proto je nutné s výstupy z tiskových procesů pracovat dynamicky. Po samotném tisku je zapotřebí substrát s natištěným motivem odložit na definovanou dobu (obvykle 10 – 15 minut). Během této doby dochází ke slinutí povrchu, lze chápat jako samonivelace. Tento proces probíhá za pokojové teploty (20°C), kdy je dosaženo optimálního poměru rovinnosti povrchu čáry vzhledem k její šířce. Výsledek je dán zejména kombinací faktorů viskozity, povrchového napětí, teploty a času.

Leveling zajišťuje dosažení vyrovnaní a homogenizace povrchu nanášeného motivu.

e) Výpal (schnutí)

Pro dosažení finálních parametrů nanášené struktury je nutné provést definované teplotní procesy. Konkrétní teplotní profily se liší charakteristikami zasušovacími a následně vypalovacími teplot v závislosti na čase. Dle typu materiálu se pohybujeme od pokojových teplot do teplot na hranici 1000°C. Speciální vrstvy jsou vypalovány na teplotách 1200°C i vyšší.

Jednotlivé fáze procesu depozice je možné detailněji prostudovat v literatuře. [1], [2], [3], [4], [6], [14], [15]

2.4 Hlavní parametry dispensního tisku

Dispensní systémy je možné charakterizovat jak podle parametrů do procesu vstupujících, tak podle parametrů tiskového výstupu. Parametry tiskového depozičního procesu lze tedy rozdělit na parametrické skupiny podle vlivu na výslednou kvalitu depozice.

2.4.1 Rozdělení parametrů dispensního procesu

Tabulka 1 Zvolené parametry dispensního tisku

Vstupní parametry	Procesní parametry	Výstupní parametry
Dávkované médium	Tiskové zařízení	Tiskový výstup
velikost částic	vnitřní průměr kapiláry	kontaktní metoda
Viskozita	vzdálenost kapilára - substrát	vysoké rozlišení
tixotropní chování	pohyb v ose X, Y, Z	Dávkované médium
Substrát	fixace substrátu	Spotřeba
Rovinnost	tlakové poměry	
Drsnost	výšková korekce	

Vstupní parametry jsou zpravidla závislé na požadavcích daného procesu. Z toho vyplývá, že tyto parametry týkající se zejména reologie dávkovaného média a geometrických vlastností substrátu, jsou parametry výchozí a nelze je měnit. Naopak výstupní parametry jsou parametry požadované, kterých je zapotřebí dosáhnout. Samozřejmostí je kvalita požadovaného tiskového výstupu, a vysoké rozlišení je specifickým důsledkem požadavků na miniaturizaci. Spotřeba dávkovaného média je spjata zejména s použitím vzácných kovů, jako je platina, zlato, stříbro apod., které jsou součástí tlustovrstvových past.

Právě procesní parametry umožňují transformaci reologických poměrů dávkovaného média za účelem docílení požadovaného tiskového výstupu. Prakticky všechny parametry se týkají tiskového zařízení. To musí být schopno zajistit v dostatečné přesnosti jindy neuvažované parametry, které s takto vysokým rozlišením je nutné nejen uvažovat, ale také optimalizovat. [2], [11], [12], [14], [15]

2.4.2 Optimalizační parametry tisku

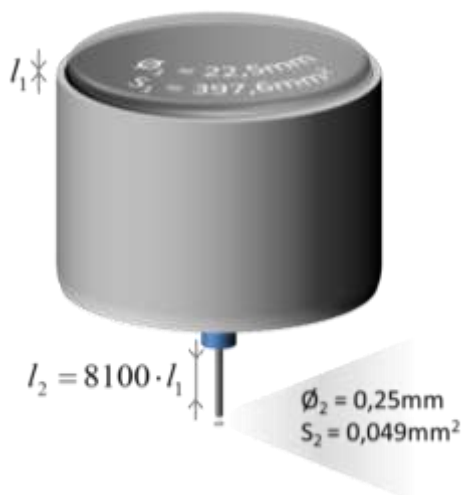
Pro optimalizaci dispensního tisku lze standardně využít procesní parametry tiskového zařízení. V této práci se soustředím na parametry dispensního tisku, které jsou běžně dostupné u tlakových dispenserů, ale pro optimalizaci tisku velmi tenkými kapilárami (vnitřní průměr do 100 μm) navíc přidávám optimalizační parametr, který byl odvozen v průběhu řešení disertační práce. Standardní parametry jsou:

- tlakové poměry pneumatického systému
- vnitřní průměr kapiláry
- vzdálenost kapilára – substrát.

Nový, pro tento typ dispenseru specifický parametr je *ultrazvuková energie*, aplikovaná prostřednictvím mechanického kmitání na transportní kapiláru. Tento parametr je výsledkem analýzy chování tixotropních materiálů v průběhu nanášení a umožňuje posunutí limitů rozlišovací schopnosti současných tlakových dispenserů.

a) Tlakové poměry

Základní uspořádání dispenseru je odvozeno od tlakového principu dispense. Tlak je aplikován přes píst prostřednictvím vzduchové mezery na hladinu dávkovaného materiálu. Objemově je roz distribuován tlak až k vyústění dispensního zásobníku, kde jsou dle hydraulického odvození známé konkrétní podmínky pro tok dávkovaného materiálu.



Použité označení:

- S_1 vnitřní průřez zásobníku dispenseru
- S_2 vnitřní průřez transportní kapiláry
- \varnothing_1 vnitřní průměr zásobníku dispenseru
- \varnothing_2 vnitřní průměr transportní kapiláry
- L_1 snížení hladiny v zásobníku dispenseru
- L_2 posun pasty v transportní kapiláře

Obr. 2.2 Hydraulické podmínky pro dispensi

Vztahy pro výpočet poměrů uvnitř dispenseru:

$$S_1 = \pi \cdot r_1^2 = 3,14 \cdot (11,25 \cdot 10^{-3})^2 = 397,6 \text{ mm}^2 \quad \frac{S_1}{S_2} = \frac{397,6 \text{ mm}^2}{0,049 \text{ mm}^2} = 8100 \Rightarrow K = \frac{S_1}{S_2}$$

$$S_2 = \pi \cdot r_2^2 = 3,14 \cdot (0,125 \cdot 10^{-3})^2 = 0,049 \text{ mm}^2$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{l_2}{l_1} = 8100 \Rightarrow l_2 = 8100 \cdot l_1$$

Rovnice 2.1

... kde K je tlaková citlivost dispenseru

Rovnice 2.1 odvozuje vzorec pro tlakovou odezvu dispenseru, který jsem stanovil jako poměr vnitřního průřezu zásobníku- S_1 a vnitřního průřezu transportní kapiláry. Tímto parametrem pak lze hrubě nastavit tlak, rychlost posuvu a ostatní parametry dispenseru.

Obr. 2.2 demonstruje tlakovou citlivost dávkování v závislosti na vnitřním průměru kapiláry. V praxi se setkáváme s minimálním tlakem, který je zapotřebí pro tokovou odezvu systému. Tento tlak je výsledkem zejména veškerého hydraulického odporu systému. Hydraulický odpor způsobený smykovým třením představuje převládající část protichůdných sil, které představují ofsetový posun tokové odezvy při určitém podlimitním tlaku.

b) Vnitřní průměr kapiláry

Průměr dávkovací kapiláry je parametr přímo závislý na typu dávkovaného média. Médium totiž obsahuje částice, které jsou mimo jiné definovány svou maximální velikostí (parametr *particle size*). Z technologických poznatků je doporučeno udržovat poměr průměru dávkovací kapiláry a maximální velikosti částic na hodnotě větší než 5.

Tato podmínka je často využívána například při volbě světlosti síta v kombinaci s konkrétní pastou.

Vnitřní průměr kapiláry dále samozřejmě ovlivňuje minimální šířku tisknutelné čáry a tlak potřebný pro tokovou odezvu systému. Se snižujícím se vnitřním průměrem kapiláry navyšujeme rozlišení tisku, při kterém však současně roste tlak pneumatického okruhu dispenseru. Poměr vnitřního průměru kapiláry a šířky tištěné čáry ale není se snižujícími se rozměry konstantní. Složení dávkovaného materiálu a tlak pneumatického systému dispenseru mají značný vliv na tyto poměry a se snižujícím se průměrem kapiláry (pod 100 μm) již není možné pracovat s nízkými tlaky přibližně do 3 atm.

c) *Vzdálenost kapilára – substrát (odstup)*

Tato vzdálenost je v souvislosti s reologickými parametry tištěných materiálů stěžejní pro bezchybný tisk (kontinuální tisk čáry se stabilním průřezem a tvarem). Ve srovnání se stabilitou parametrů jako jsou *tlak* nebo *rychlost posuvu* je hodnota *odstupu* mnohem více problematická z hlediska její stabilizace na konstantní úrovni. Tisk s rozlišením pod 100 μm metodou tlakového dispenseru je problematický právě z hlediska odstupu tiskové hlavičky od substrátu. Tento parametr musí být udržován v optimálním poměru vzhledem k *tisknutelné tloušťce vrstvy* a její *šířce* v souvislosti s *viskozitou materiálu* a *adhezí k substrátu*. Při tisku s kapilárou o vnitřním průměru pod 50 μm je odstup od substrátu optimální udržovat na hodnotě 50 μm s přesností ± 1 μm . Změna odstupu o více než 3 μm vykazuje problémy, pokud udržujeme ostatní parametry (tlak, přídavná energie a rychlost posuvu) konstantní.

Z tohoto důvodu hodnotu *odstupu* není možné ponechat pouze na přesném polohování v rovině XY, jelikož nerovnost sériově dodávaných substrátů Al_2O_3 se standardně pohybuje okolo 50 μm na vzdálenosti 50 mm. Proto je nutné v ose Z provádět korekci pro planoparalelní pohyb s povrchem substrátu a docílit tak konstantní hodnoty *odstupu* v řádu jednotek μm .

d) *Optimalizace viskozity pasty ve výstupní kapiláře (nová metoda)*

Ve výstupní kapiláře z fyzikální podstaty již bez dodatečných úprav dochází k redukci viskozity a tím k optimalizaci reologie dávkovaného materiálu. Tento vliv je však dostatečný pouze v případě, že využíváme standardní kapiláry s průměrem nad 150 μm . Při použití jemnějších kapilár je nutné tento vliv zesílit a toho je možné dosáhnout právě přídavnou ultrazvukovou energií, jejíž aplikace je v této oblasti novou metodou ovlivňující pouze nezbytné množství materiálu na výstupu. Jedná se o optimalizaci viskozity pasty v okamžiku separace dávkovaného množství materiálu od výstupu kapiláry prostřednictvím mechanických kmitů na rozhraní mezní vrstvy pasta – stěna kapiláry.

Optimalizace pasty ve výstupní kapiláře umožňuje posunutí limitu rozlišovací schopnosti dispensního tisku pod objemové množství 1 nanolitr, při použití standardních tlustovrstvových materiálů. [2], [6], [11], [12], [14], [15]

2.5 Cíle disertační práce

Název práce:

Nové oblasti aplikace ultrazvuku v mikroelektronických technologiích

Cíl práce:

Optimalizace nanášení tixotropních materiálů s využitím ultrazvukové energie

Tento cíl je klasifikován jako hlavní výsledek disertační práce.

Cíl je možné dále blíže specifikovat:

Dílčí cíle práce:

A/ Výzkum vlivu ultrazvukového působení na chování tixotropních materiálů

- Tixotropní vlastnosti materiálu během tisku
- Popis přenosu kmitů v kapiláře – dynamické tření

B/ Návrh a konstrukce dispensní hlavice s ultrazvukovou optimalizací.

- Návrh a konstrukce dispensní hlavice
- Detailní popis funkce UZ jednotky

C/ Aplikace ultrazvukového principu pro soustředění přídavné energie v místě dávkovací kapiláry.

- Ověření vlivu na depozici past, zkušební tisky
- Srovnání se sítotiskem, vyhodnocování dosaženého rozlišení

D/ Optimalizace tokové křivky nanášeného materiálu uvnitř dispensní jehly.

- Popis vlivu na tokové křivky nanášeného materiálu
- Nastavení parametrů dispensního procesu

E/ Simulace parametrického modelu proudění média kapilárou.

- Vytvoření modelu s využitím základních parametrů

3 Výsledky disertační práce

Dílčí cíl A:

Výzkum vlivu ultrazvukového působení na chování tixotropních materiálů

Realizace:

Pro dosažení tohoto cíle bylo vytvořeno pracoviště dispensního tisku s možnostmi realizace tlustovrstvových vzorků a jejich následné měření na pracovišti. *Kapitola 3.2.*

Po ověření tixotropního chování dávkovaného materiálu během tisku bylo nutné zařízení optimalizovat pro tisk s vysokým rozlišením. *Kapitoly 3.3, 3.4 a 3.5.*

Dílčí cíl B:

Návrh a konstrukce dispensní hlavice s ultrazvukovou optimalizací

Realizace:

Na základě testů tisku standardním dispenserem byl proveden návrh ultrazvukové dispensní hlavice (UZD). *Kapitoly 3.6, 3.7 a 3.8.*

Konstrukce UZD dle návrhu a její následná optimalizace na základě testování. V práci jsou uvedeny 3 vývojové stupně UZD. *Kapitoly 3.6, 3.7, 3.8 a 3.12.*

Detailní popis jednotlivých vývojových stupňů z hlediska požadované funkce. *Kapitoly 3.6, 3.7 a 3.8.*

Dílčí cíl C:

Aplikace ultrazvukového principu pro soustředění přídavné energie v místě dávkovací kapiláry, která bude cíleně ovlivňovat parametry tisku.

Realizace:

Tisk pasty s vývojovým stupněm UZD3.

Zkušební tisky, programové subrutiny pro tisk, optimalizace UZD hlavice, výroba dílů pro tiskové zařízení. *Kapitoly 3.8, 3.9, 3.10.3, 3.11 a 3.12.*

Srovnání s výsledky sítotiskových a dispensních procesů. *Kapitola 3.13.*

Dílčí cíl D:

Optimalizace tokové křivky nanášeného materiálu uvnitř dispensní jehly.

Realizace:

Rozbor technologického procesu dispense a toku kapilárou. *Kapitoly 3.3, 3.4, 3.11.2.*

Popis vlivu dynamického tření na mezní vrstvu dávkovaného materiálu. *Kapitoly 3.3.*

Dílčí cíl E:

Simulace parametrického modelu proudění média kapilárou.

Realizace:

Byla provedena základní simulace proudění média kapilárou o průměru 30, 50 a 100 μm . Výsledky byly porovnány. *Kapitola 3.4.4.*

3.1 Vlastní analýza řešení

3.1.1 Vliv ultrazvuku

Myšlenka aplikace ultrazvukové energie za účelem ovlivnění reologických vlastností pasty vznikla na základě testů působení ultrazvuku na objemové množství pasty v kádince. Tento test byl prováděn v laboratoři pouzdření a propojování Ústavu mikroelektroniky na VUT v Brně. Měřením bylo zjištěno, že pro tlustovrstvovou technologii z hlediska temperování materiálu jsem schopen tento proces urychlit v ultrazvukové myčce. Myčka prostřednictvím vodní lázně přenáší kmity na kelímek s pastou, a tím dochází k prohřívání jeho obsahu.

Na základě těchto testů jsem začal studovat vliv ultrazvuku na tixotropní materiály. Nejdříve jsem se musel seznámit s reologickými vlastnostmi piezokeramických rezonátorů. K tomu bylo možné využít konstrukčních dílů pro kontaktovací zařízení (wire-bonding), a to **akustický transformátor**, obr. 3.1. Toho jsem využil pro měření rezonanční charakteristiky uvedené na obr. 3.2.

Měření rezonanční frekvence probíhalo na základě měření úbytku napětí na sériovém odporu, který indikoval protékající proud rezonančním systémem. Měření bylo provedeno pomocí funkce krokování frekvence od 1 Hz do 60 kHz, přičemž hodnoty byly zaznamenávány s rozlišením 100 Hz, přičemž oblasti napěťových peaků byly proměřeny individuálně s rozlišením až 1 Hz. Tyto maxima znamenají zvýšený proudový odběr piezokeramických rezonátorů, které převádějí elektrický signál na mechanické kmity o dané frekvenci.

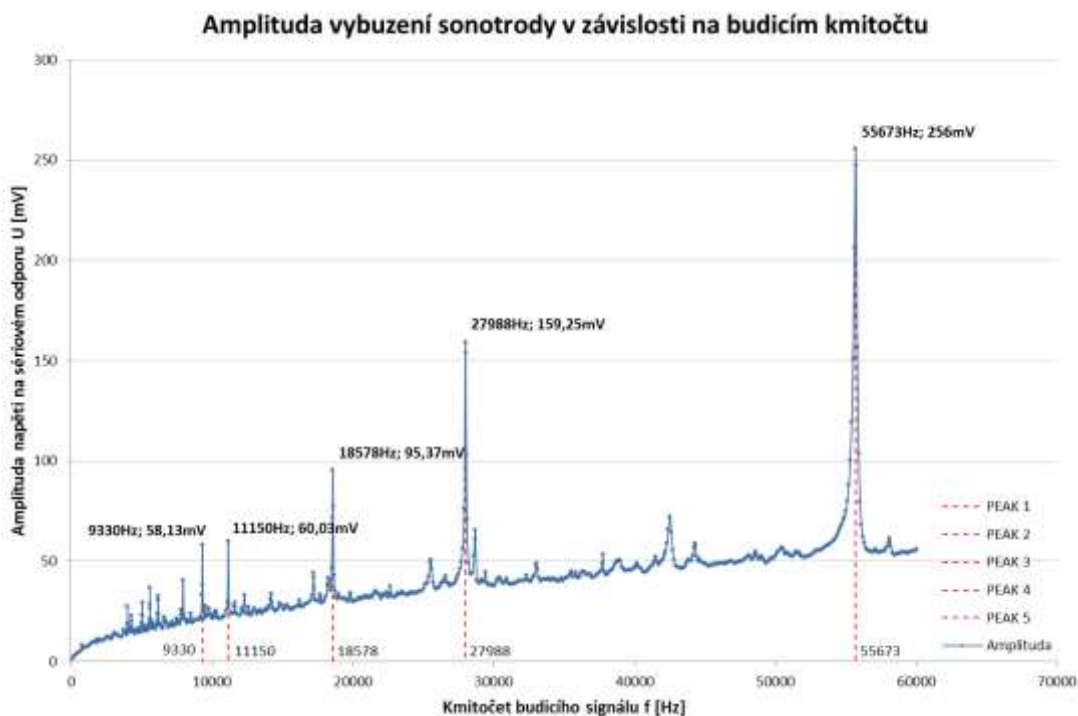


Obr. 3.1 Přizpůsobený akustický transformátor ze zařízení pro wire-bonding

Frekvence budicího signálu byla na základě měření frekvenční charakteristiky na obr. 3.2 nastavena na jednotlivé naměřené hodnoty, které byly porovnávány z hlediska síly rezonance příkládáním kovové tyčinky k hrotu sonotrody. Pro měřenou sonotrodu byly použity frekvence uvedené v tabulce.

Tabulka 2 Rezonanční frekvence s hodnotami úbytku napětí na sériovém napětí

Rezonanční frekvence	9330 Hz	11150 Hz	18578Hz	27988 Hz	55673 Hz
Napěťový úbytek na seriovém odporu	58,13 mV	60,03 mV	95,37 mV	159,25 mV	256 mV



Obr. 3.2 Naměřená rezonanční charakteristika akustického transformátoru

Řešení rezonančního systému pro UZD hlavici je uvedeno v kapitolách 3.6, 3.7 a 3.8. [1], [5]

3.1.2 Volba piezokeramických rezonátorů

Na základě měření a testů s akustickým transformátorem jsem provedl rešerši těchto metod a z hlediska optimalizace reologických vlastností tixotropních materiálů tato práce popisuje zcela novou metodou použití ultrazvuku v dispensních procesech. Po provedení průzkumu v oblasti dodavatelů jsem kontaktoval společnost *Noliac*, kde jsem na základě konzultací objednal *piezokeramické rezonátory* (materiál NCE80) [16], [17], [18]. Tento materiál vykazuje z hlediska použití optimální poměr amplitudy a napětí budicího signálu.

Tabulka 3 Parametry piezokeramických měničů Noliac Ceramics NCE80, $\varnothing_o=20\text{mm}$, $\varnothing_i=10\text{mm}$, $t=4\text{mm}$ [18]

	f_s [kHz]	f_p/f_s	$ Z $ [Ω]	C_{33}^T [pF]	$\tan \delta$ $\cdot 10^{-4}$	ε_{3r}	k_{eff}	Q_m
max	73,3	1,077	34	600	26	1152	0,371	910
Min	72,9	1,071	30	574	23	1101	0,358	800
průměr	73,067	1,075	32,5	592	24,8	1136	0,367	845

Konstrukce mechanického provedení ultrazvukové hlavice (UZD) pro soustředění mechanických kmitů do objemu dávkovaného média již probíhalo dle jednotlivých návrhů (kapitoly 3.6, 3.7, 3.8) na základě vlastních myšlenek konzultovaných s kolegy. Vývoj práce byl také směřován na požadavky, které vyplývaly z mnoha konferenčních setkání se zahraničními kolegy a zástupci firem.

3.1.3 Rezonanční frekvence / amplituda

Rezonance systému a amplituda budících kmitů jsou parametry, které přímo souvisejí s konstrukčním uspořádáním, a není efektivní je předem detailně navrhovat. Vzhledem k nutnosti ověření samotného principu bylo nejvhodnější sestavit první UZD jednotku, která následně umožní posoudit naměřené parametry (kapitola 3.6.2). Parametry rezonanční charakteristiky byly měřeny dle postupu, který je uveden v kapitole 3.1.1.

Amplituda budícího signálu byla nejdříve odvozena od výstupu funkčního generátoru, a poté byl sestaven zesilovač, kterým bylo možné dosáhnout požadovaného signálu (kapitoly 3.6.2, 3.7.2).

3.1.4 Příprava pro vývoj UZD

S významnou podporou vedoucího práce doc. Szendiucha jsem byl schopen připravit pracoviště pro výzkum vlivu působení ultrazvukové energie na chování tixotropních materiálů (kapitola 3.2). Návrh a vybavení pracoviště bylo připravováno na základě průzkumu technologie v dané oblasti. Pracoviště bylo vybaveno automatickým dispensním robotem Fisnar F4200N [11], optickou jednotkou pro sledování výstupu dispensního procesu, a mnoha funkčními doplňky, které jsem vyrobil v rámci řešení práce.

3.1.5 Poptávka po technologii (tisk s vysokým rozlišením)

Na základě účasti na konferencích ISSE, ESTC a EMPC, které se zabývají oblastí mikroelektronických technologií, technologických řešení a novými technologiemi jsem se v průběhu řešení této práce profiloval a technologické řešení směřoval k požadavkům kolegů ze zahraničních i českých univerzit a kolegům z průmyslu. Průmyslové partnery jsem kontaktoval také na veletrzích v Mnichově a Norimberku, kde každoročně udržujeme kontakt s technologickými novinkami.

Výsledky v této oblasti jsou orientovány zejména na miniaturizaci, která však dosahuje rozlišení pod 150 μm se stejnými nanášenými materiály. Vyšší rozlišení dosahované současnými metodami bylo také prezentováno, avšak kvalita tisku zdaleka nedosahuje kvality výsledků této práce (kapitola 3.13).

3.1.6 Technologické znalosti

Znalosti z oblasti dispense a tlustovrstvové technologie jsem získal v rámci studia na VUT v Brně. Souvislosti mezi dalšími oblastmi vývoje UZD byly řešeny v rámci konzultací, seminářů, a mnoha měření v rámci laboratoří UMEL VUT v Brně. V mnoha oblastech jsem využíval rady kolegy Ing. Řezníčka a Ing. Jankovského.

3.2 Vytvoření pracoviště pro dispensní tisk

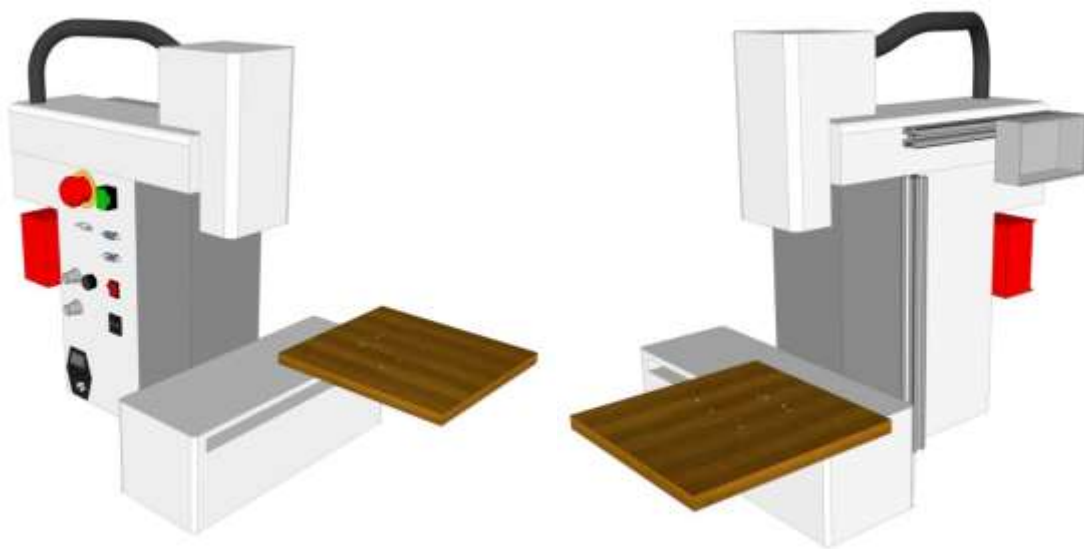
V průběhu vývoje metody pro nanášení TLV past s vysokým rozlišením bylo sestaveno pracoviště dispensního tisku a pro tuto oblast byla specifikována vhodná zařízení. Pracoviště je navrženo za účelem realizace testovacích struktur, měření parametrů a jejich optimalizace.

Pro polohování vyvíjené UZD hlavice byl zvolen poloautomatický polohovací robot F4200N. Zařízení je doplněno o dávkovací jednotku zajišťující distribuci tlakového vzduchu. Pracoviště je vybaveno optickým systémem pro online sledování procesu tisku.

3.2.1 Polohovací zařízení Fisnar F4200N

Dispensní robot Fisnar F4200N je využit z hlediska 3-osého polohování ultrazvukové dispensní hlavice [11]. Mezi podstatné parametry tohoto dispensního robotu z hlediska použitelnosti pro mou práci lze zařadit následující:

- | | |
|--|----------------------------|
| - zatížitelnost ramene pro pracovní stůl | 3 kg |
| - zatížitelnost ramene pro nástroj | 1 kg |
| - pracovní rozsah v osách X, Y, Z | 200 / 200 / 50 mm |
| - rozlišení jednotlivých posuvů | 1 μm / osa |
| - opakovatelnost posuvů | +/- 20 μm / osa |

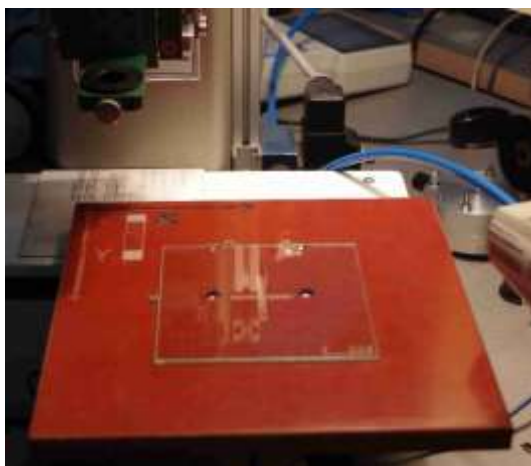


Obr. 3.3 Dávkovací robot Fisnar F4200N, model pro konstrukci doplňků

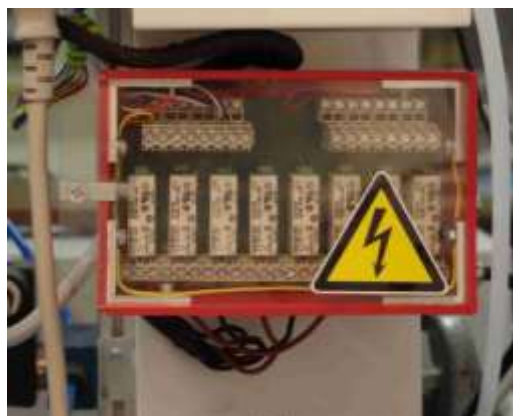
Obr. 3.3 zobrazuje model konstrukce zařízení Fisnar F4200N a jeho úpravy. Pro dispensní robot byly vyrobeny *stolky* s vakuovým systémem aretace vzorku a dorazovými kolíky (obr. 3.4). Výchozí určení těchto stolků je provedeno s ohledem uchycení 2“ a 4“ keramických substrátů pro tisk hybridních integrovaných obvodů (HIO).

Modul umístěný v zadní části systému (obr. 3.5) obsahuje *spínací elektroniku* výkonových periférií. Tento modul obsahuje 8 reléově spínaných větví s indikací stavů. Modul umístěný na hliníkovém profilu (obr. 3.5) slouží jako *rozvodná skříň* napájení 230 VAC. Tyto úpravy umožňují řídit pomocí I/O signálů vnější periferie a jejich přímé spínání v případě ventilů. Zařízení bylo osazeno tlakovým ventilem pro spínání vakuového okruhu aretace vzorku. Tato funkce umožňuje aretovat substrát

před započítím pohybu. Ovládání ventilu je možné přímo programem pomocí I/O signálu.



Obr. 3.4 Fixační stolky pro Fisnar F4200N



Obr. 3.5 Rozvodná skříň (vlevo), spínací skříň (vpravo)

Úpravy zařízení:

- výroba fixačních stolků (mechanická část)
- rozvodná skříň (elektronika)
- spínací skříňka (elektronika)
- spínací ventil (pneumatický systém)

3.2.2 Dávkovací jednotka

Distribuční systém tlakového vzduchu byl vybaven jednotkou Fisnar SL101-220. Jedná se o programovatelný digitální dávkovač tlakového vzduchu, který má rozsah výstupu od 0,1 do 7 barů. Časovač lze nastavit od 0,1 do 9999 sekund. Na základě dodaného softwaru k jednotce F4200N je možné programově řídit dávkovač.

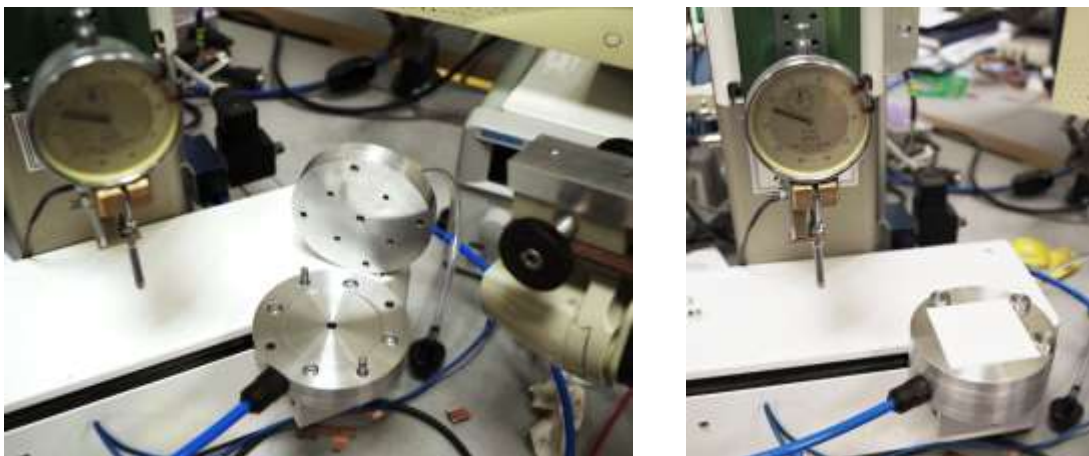


Obr. 3.6 Digitální dávkovač stlačeného vzduchu Fisnar SL 101-220 [11]

3.2.3 Výroba precizního držáku substrátů

Na základě testovacích tisků se stolky pro tisk s kapilárou o vnitřním průměru 200 μm a následným přechodem na kapiláru 150 μm bylo nutné vyrobit duralový fixační stolek pro precizní uchycení substrátu vzhledem k nutnosti planparalelního uložení s polohovací rovinou XY.

Tento stolek umožňuje vakuovou fixaci vzorku a definovat výchozí natočení substrátu pomocí stavitelných dorazových modulů. Stolek umožňuje provést měření nerovnosti povrchu a následnou softwarovou korekci výšky substrátu.



Obr. 3.7 Duralový fixační stolek

3.2.4 Shrnutí kapitoly 3.2

Bylo vytvořeno pracoviště s poloautomatickým dispensním robotem Fisnar F4200N. Pro tento robot bylo vyrobeno příslušenství a jako celek byl optimalizován pro tisk s vysokým rozlišením.

3.3 Nová metoda dispensního tisku

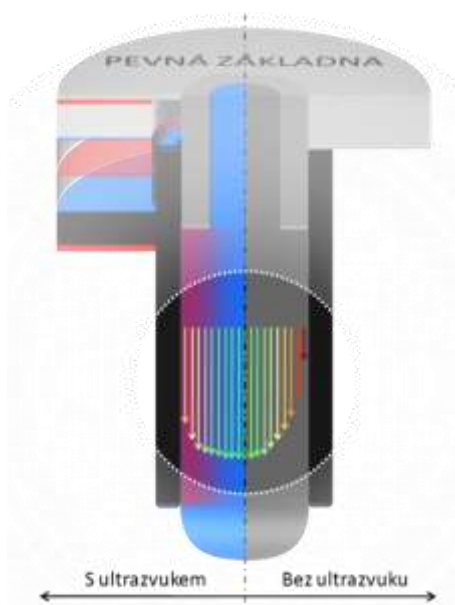
Dispensní tisk standardně znamená depozici materiálu ze zásobníku skrze transportní kapiláru na substrát. Na výstupu z kapiláry tvoří dávkované médium vrchlík, jehož tvar je závislý zejména na viskozitě dávkovaného média, tlaku a vnitřním průměru výstupní kapiláry.

Tento model funkce dispensního systému je dostačující pro systémy s rozlišením do 250 μm . Jakmile požadujeme tisk s vyšším rozlišením, rostou parazitní vlivy, které v důsledku vyšší míry integrace stále více ovlivňují kvalitu tisku. Zde je třeba uvažovat zejména vlastnosti dávkovaných médií, kdy je nutné počítat se vzájemnými vztahy

mezi parametry viskózních materiálů, vnitřním průměrem výstupní kapiláry, tlaku pneumatického systému a vzdáleností kapilára – substrát.

U dispensních procesů s konfigurací pro tisk s vysokým rozlišením (pod 100 μm) je nutné uvažovat rostoucí vlivy jednotlivých parametrů. Na základě popisu optimalizačních možností dispensních parametrů uvedených v kapitole 2.4.2 je dále uveden princip nové metody UZD.

Nová metoda UZD je založena na přidavné energii působící prostřednictvím transportní kapiláry na dávkovaný materiál. Na transportní kapiláru jsou přenášeny mechanické kmity, které způsobují nárůst dynamického tření mezi kapilárou a mezní vrstvou pasty v průběhu jejího toku kapilárou. Toto tření v pastě vyvolává změny její reologie snižováním viskozity mezní vrstvy a tím umožňuje snazší průchod kapilárou za působení nižšího tlaku a dosažení rovnoměrnějšího tokového vrchlíku.



Obr. 3.8 Srovnání dispense s využitím ultrazvukové přídavné energie a standardního procesu

3.4 Základní princip ultrazvukové jednotky UZD

3.4.1 Parametry procesu dispense s UZ podporou

Dispense materiálů tenkou kapilárou je závislá na parametrech souvisejících s laminárním charakterem proudění.

Prvním podstatným omezením je **vnitřní průměr (d_{in})** kapiláry, který je z důvodu zvýšení rozlišení omezen na interval od 30 do 100 μm . Tento velmi malý vnitřní průměr kapiláry tak razantně zvyšuje citlivost systému na ostatní parametry.

Dávkované materiály jsou definovány svou **zdánlivou viskozitou (η)** a **tixotropním chováním**. Tento parametr není možné ovlivnit, ale je to vstupní parametr, od kterého se dále odvíjí nastavení celého systému.

Citlivost a průchodnost dispense lze nastavit pomocí **tlakových poměrů (P)** uvnitř kapiláry, a **ultrazvukové podpory**. V souvislosti s těmito čtyřmi proměnnými probíhají změny charakteru laminárního proudění, respektive dochází k ovlivnění rozložení rychlosti tokových křivek v průřezu kolmém na osu toku kapilárou.

Ze vztahů pro proudění vazkých kapalin uvnitř kapiláry lze odvodit vliv **ultrazvukové podpory** na rozložení tokových křivek dávkovaného média v kapiláře. Lze vyjít ze vstupních parametrů d_{in} a η , pro které jsou stanoveny výchozí hodnoty tlaku a UZ podpory. Protože viskozita kapaliny vyjadřuje míru odporu při vzájemném pohybu částic uvnitř kapaliny, lze ji zjednodušeně vnímat jako *vnitřní tření*. Transportní kapilára je ve styku s dávkovaným médiem, a pohyb vyvolaný působením tlaku brzdí. Toto brždění je prostřednictvím tření na rozhraní *kapilára – viskózní kapalina*, kde dochází prakticky k zastavení pohybu molekul pasty. Toto rozhraní se nazývá **mezí vrstva**. V ose kapiláry je toková rychlost média vyvolaná tlakem nejvyšší z pole tokových křivek v kapiláře. Spojnice středu kapiláry a odpovídající úrovně stěny tvoří přibližně exponenciální křivka opisující tokové křivky média v souvislosti s brzdícím účinkem vyvolaným vzájemnými třecími silami.

Pro odvození vztahu mezi ultrazvukem a změnou tokových křivek při laminárním proudění musím uvést zásadní vlastnosti tixotropních (pseudoplastických) látek, které při působení tlaku, napětí potažmo teploty snižují svou viskozitu. Souosé mechanické kmity kapiláry (kapitola 3.3) tak znamenají pro odpovídající okolí zdroj dynamického tření, které má zásadní vliv na lokální změnu viskozity. Viskozita dávkovaného média v kapiláře tak symetricky od středu klesá. Charakter jejího poklesu je závislý na vnitřním průměru kapiláry, typu média, výkonu ultrazvuku, drsnosti vnitřního povrchu pláště kapiláry a tlaku. Těmito parametry je možné optimalizovat tokové křivky v kapiláře. [19]

3.4.2 Základní funkční bloky UZD

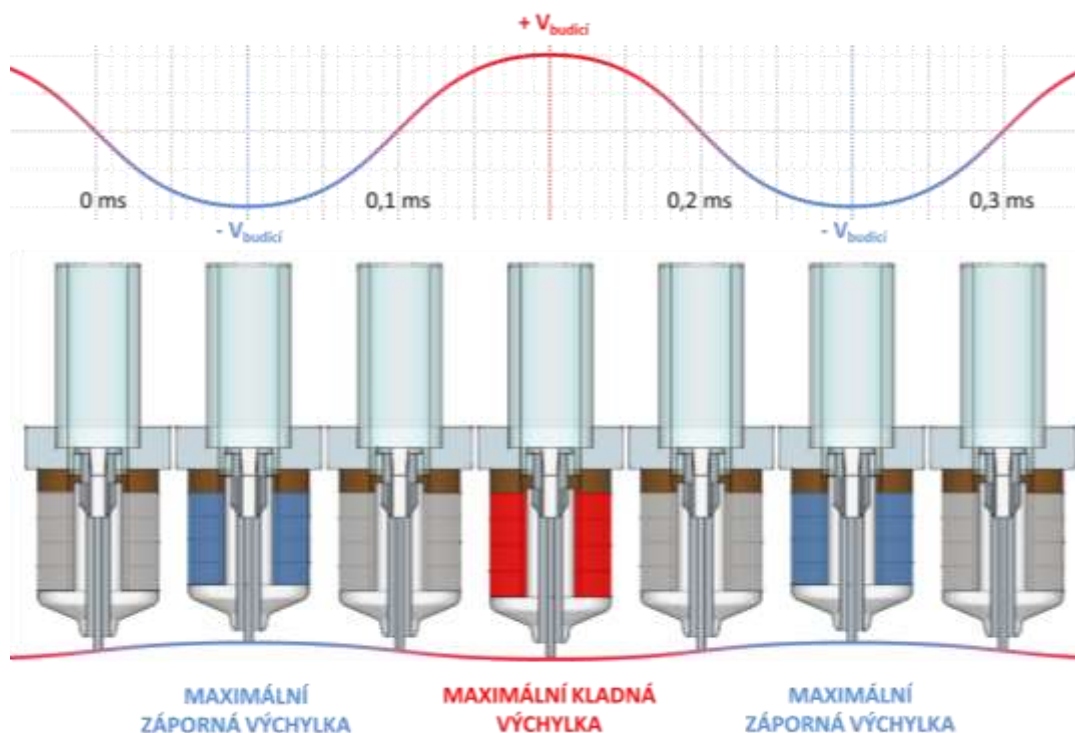
Obecně zařízení využívající působení ultrazvuku pracují se **zdrojem signálu** a určitým elektronickým prvkem pro úpravu amplitudy signálu na požadovanou hodnotu, v našem případě **zesilovač**. Tento signál je následně přiveden na aktivní prvky, které jsou v případě této práce tvořeny **piezokeramickými rezonátory**. Aktivní prvky slouží pro převod elektrického signálu na mechanické kmity zajišťující požadovanou funkci zařízení. Mechanické kmity vyvolané na základě deformace rezonátorů je nutné transformovat do cíleného místa a k tomuto účelu je využíván **akustický transformátor**. Tato součást mechanicky spojuje zdroj mechanických kmitů a cílenou oblast, do které mechanické kmity přivádí. V případě UZD je cílem **transportní kapilára**, která svými mechanickými kmity již ovlivňuje reologické vlastnosti nanášeného materiálu prostřednictvím vzájemného styku v mezí oblasti.

Ultrazvuková dispensní jednotka je složena z následujících funkčních bloků:

- Zdroj budicího signálu (funkční generátor)
- Zesilovač střídavého signálu (obr. 3.21)
- Piezokeramické rezonátory (kapitola 3.6.1)
- Akustický transformátor (obr. 3.25)
- Transportní kapilára (obr. 3.24)

3.4.3 Znázornění funkce UZD hlavice

Na obr. 3.9 je znázorněna mechanická odezva ultrazvukové hlavice prostřednictvím rezonančního systému na přivedený budicí signál. Sinusový signál zobrazuje 2 extrémy. + $V_{budicí}$, což je kladné budicí a - $V_{budicí}$, záporné budicí napětí. Při dosažení těchto extrémů zároveň dochází k maximálnímu vychýlení / rozměrové deformaci UZD systému. Tato deformace se projevuje souosými kmity transportní kapiláry.



Obr. 3.9 Mechanická odezva UZD na budicí signál

Obr. 3.9 uvádí příklad mechanické odezvy při použití budicího signálu s frekvencí 10 kHz. Model hlavice reprezentuje provedení UZD2, který využívá standardní dispensní zásobník a kapiláru. Princip rezonančního systému složeného z piezokeramických rezonátorů, elektrod a transformátoru mechanických kmitů plní stejnou funkci ve všech vývojových stupních UZD. Provedení se liší z pohledu fixace transformátoru mechanických kmitů na transportní kapiláru. Tento spoj musí vykazovat co nejmenší útlum mechanických kmitů z důvodu efektivity procesu.

Aktivní prvky rezonančního systému svou mechanickou výchylkou zprostředkovávají cílenou deformaci transportní kapiláry, jak je uvedeno na obr. 3.9.

3.4.4 Výpočet prodloužení piezokeramických rezonátorů

Pro použitý materiál NCE 80 výrobce Noliac je parametr piezoelektrické konstanty $d = 240 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$. Poměrné prodloužení je v této práci označeno l_p .

$$\text{piezoelektrická konstanta} = \frac{\text{poměrné prodloužení piezokeramiky}}{\text{intenzita elektrického pole}}$$

$$l_p = d \cdot E$$

$$l_p = 240 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{N}} \cdot 10 \frac{\text{kV}}{\text{m}} = 240 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{N}} \cdot 10 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{C}}$$

$$l_p = 240 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{N}} \cdot 10 \cdot 10^3 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{C}}$$

Rovnice 3.1 Poměrné prodloužení piezokeramik l_p

$$l_p = 2,4 \cdot 10^{-6} m \text{ při } E = 10 V/mm$$

poměrné prodloužení piezokeramiky v rezonanci $l_R = Q_m \cdot l_p$

Rovnice 3.2 Prodloužení piezokeramik v rezonanci l_R

Q_m je mechanický faktor kvality, který z hlediska piezokeramických rezonátorů dosahuje hodnoty až 1000. Tento faktor však dosahuje hodnoty 1000 v ideálních případech, samotných piezokeramik a bez zatížení. Mechanický faktor je silně ovlivněn konstrukcí funkčních bloků, které jsou pomocí piezokeramických rezonátorů uváděny do pohybu. Celkový mechanický faktor pak vykazuje pouze zlomek původního mechanického faktoru Q_m samotných piezokeramik. Z hlediska frekvenční charakteristiky UZ jednotky například obr. 3.2 je možné vidět, že faktor se pohybuje do hodnoty 5. Při tomto působení je možné dosáhnout výchylek UZD hlavice v řádu jednotek μm . [18], [19], [20]

$$l_{pR} = 5 \cdot 2,4 \cdot 10^{-6} m$$

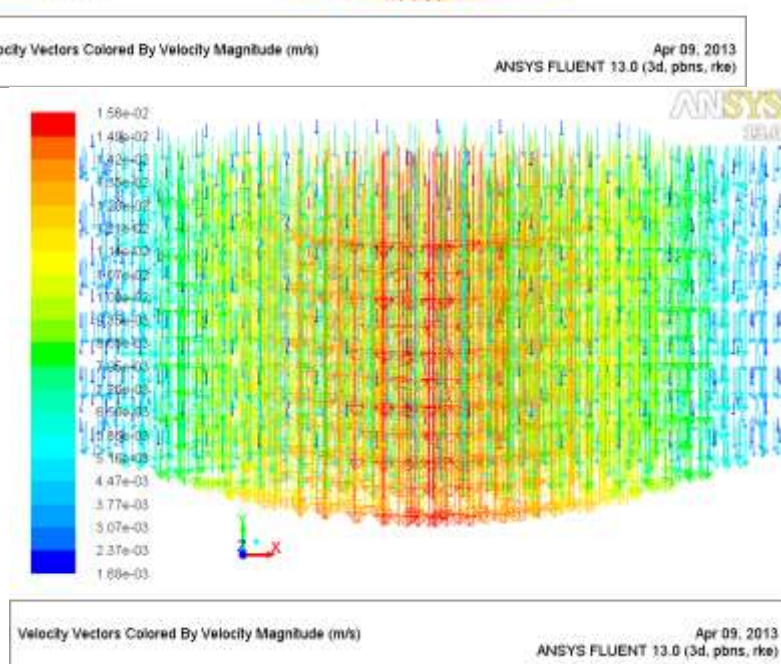
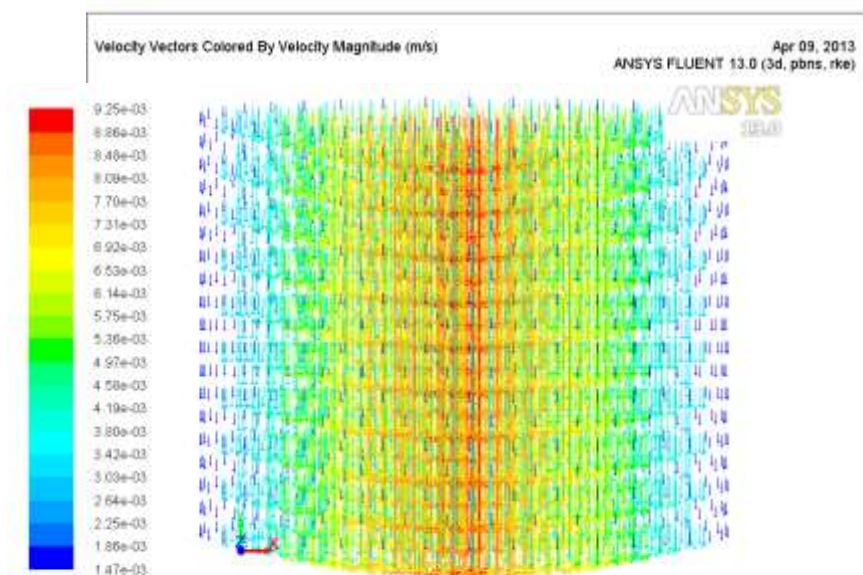
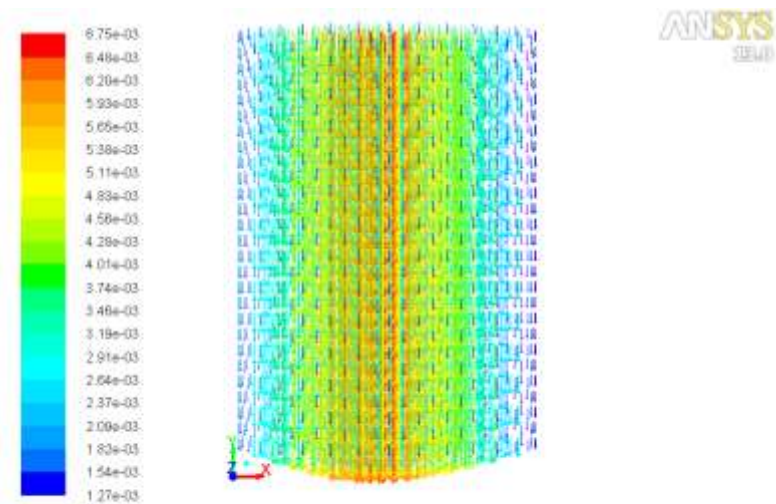
$$l_{pR} = 12 \mu m \text{ při } E = 10 V/mm$$

Rovnice 3.3 Prodloužení piezokeramik sestavy v rezonanci

3.4.5 Model transportní kapiláry, simulace

Pro provedení simulace byl zadán průměr transportní kapiláry a tlak působící na materiál o určité viskozitě. Na základě těchto parametrů byla provedena simulace chování pasty v průběhu její depozice skrze kapiláru. Obr. 3.10 uvádí výsledky simulace toku média kapilárou, kde je patrné nehomogenní rozložení tokových křivek. Tento charakter tokových křivek je způsoben třením dávkovaného materiálu na mezní vrstvě (kapilára – médium). Tření je možné redukovat novou metodou využívající ultrazvuk ke generování mechanických kmitů, jak je uvedeno v kapitole 3.3.

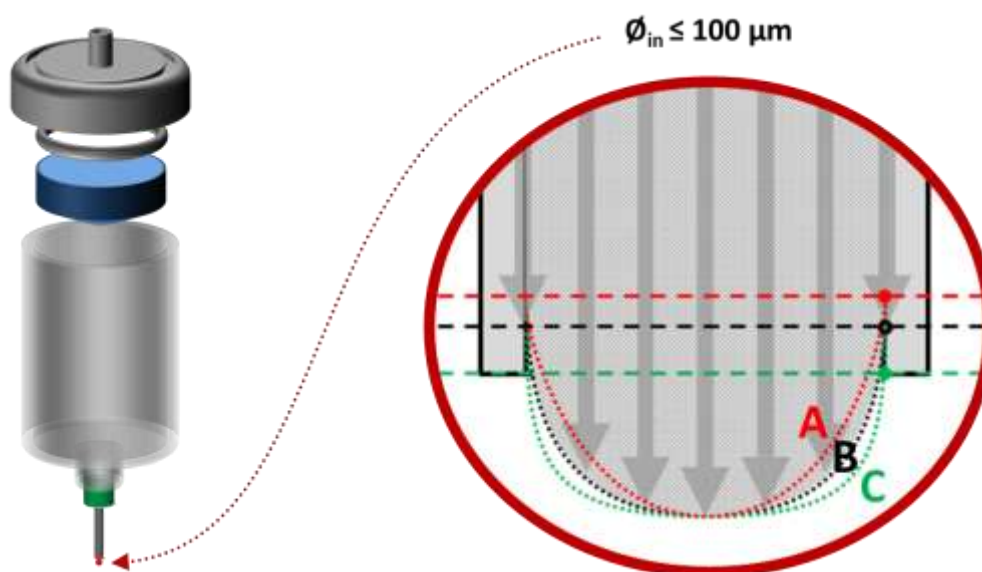
Vstupní parametry pro simulaci jsou parametry dispensního procesu. Jedná se o tlak, jehož hodnota pro simulaci byla nastavena na 1 atm. Viskozita dávkovaného média byla nastavena na hodnotu 200 Pa.s a vnitřní průměry kapilár jsou 30, 50 a 100 μm . Ostatní parametry pro simulaci jsou převzaty z materiálových konstant v simulačním programu, přičemž jako materiál kapiláry byla zvolena ocel. [9]



Obr. 3.10 Simulace toku dávkovaného média skrze transportní kapiláru o průměru 30, 50 a 100 µm

3.5 Oblast působení vlivu UZ v transportní kapiláře

Jak je uvedeno v kapitole 3.3, práce se zabývá optimalizací průtoku dávkovaného média skrze výstupní kapiláru. Obr. 3.11 vymezuje oblast, která je posledním stupněm možné optimalizace reologických vlastností média před jeho výstupem z dispensního systému. Detail na obr. 3.11 znázorňuje řez kapilárou, kde jsou ohraničeny tři oblasti (A, B, C). Hranice oblastí vymezují plochu vrchlíku vytlačeného materiálu za různých podmínek upravujících hydraulický tok. Tato oblast, která se nachází na samotném konci dispensního procesu, je vhodná pro lokální ovlivnění reologických vlastností pasty, jelikož zde ovlivněná pasta již bude deponována na substrát. Z tohoto důvodu byl tento prostor zvolen pro aplikaci mechanických kmitů.



Obr. 3.11 Parametry vyplývající z konstrukce systému a vlastností dávkovaného média (průměr, viskozita)

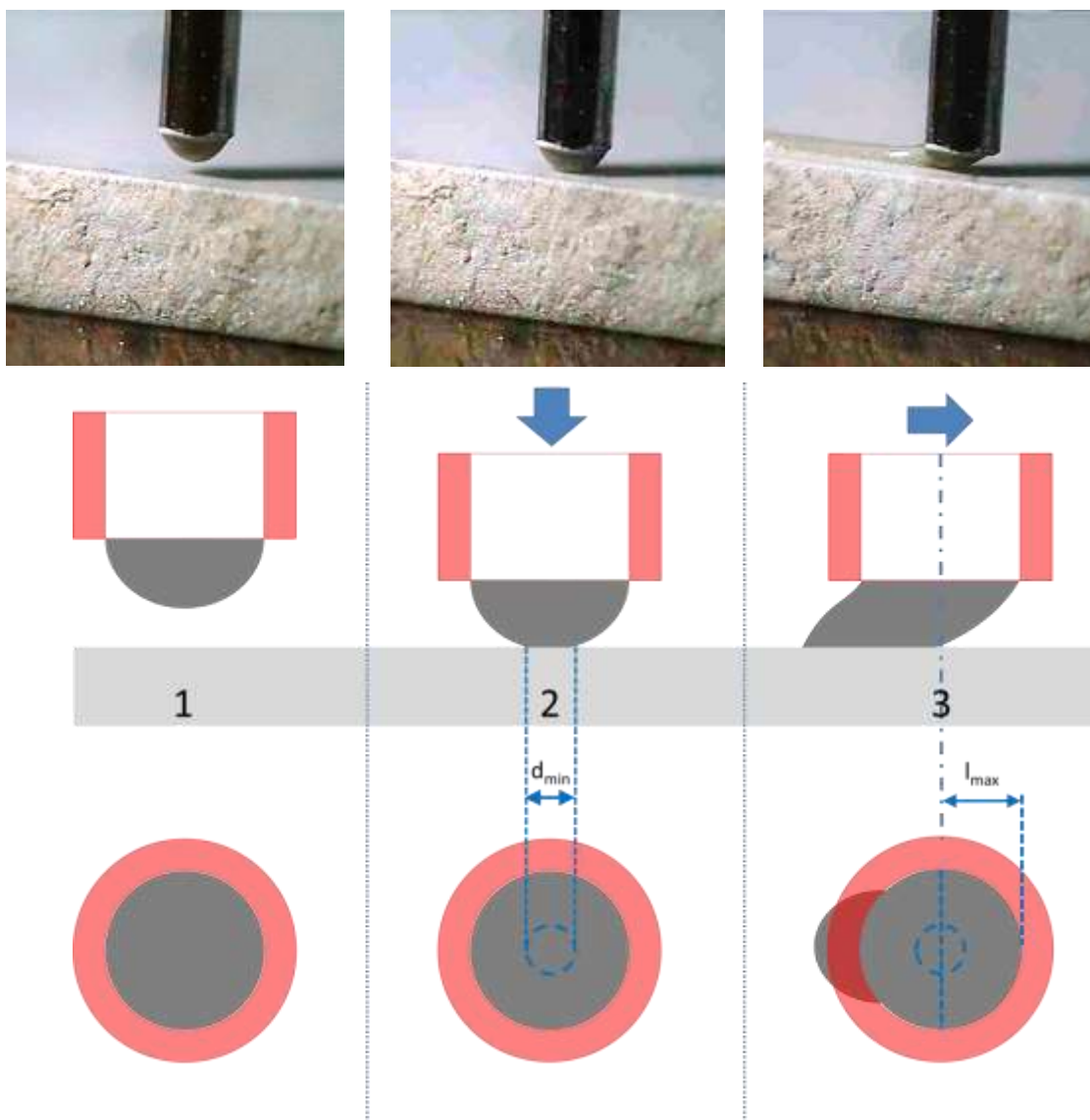
3.5.1 Adhezní podmínka

Pro jednotlivé aplikace je vždy zapotřebí stanovit hodnoty jednotlivých parametrů dispense. Pro dostatečnou adhezi v závislosti na vnitřním průměru dávkovací kapiláry a styčné ploše pasty je nutné dodržet následující parametry:

- Rychlost posuvu pod $< v_{limitní}$
- Tlak pneumatického systému $> p_{limitní}$
- Výkon ultrazvukové jednotky $> P_{limitní}$

Hodnoty limitních parametrů $v_{limitní}$, $p_{limitní}$ a $P_{limitní}$ jsou závislé na typu pasty a vlastnostech povrchu substrátu. Z tohoto důvodu je nutné vždy změřit interval hodnot, pro které je možné kombinovat jednotlivé parametry. Optimální nastavení lze provést pomocí faktorové analýzy například 2^3 .

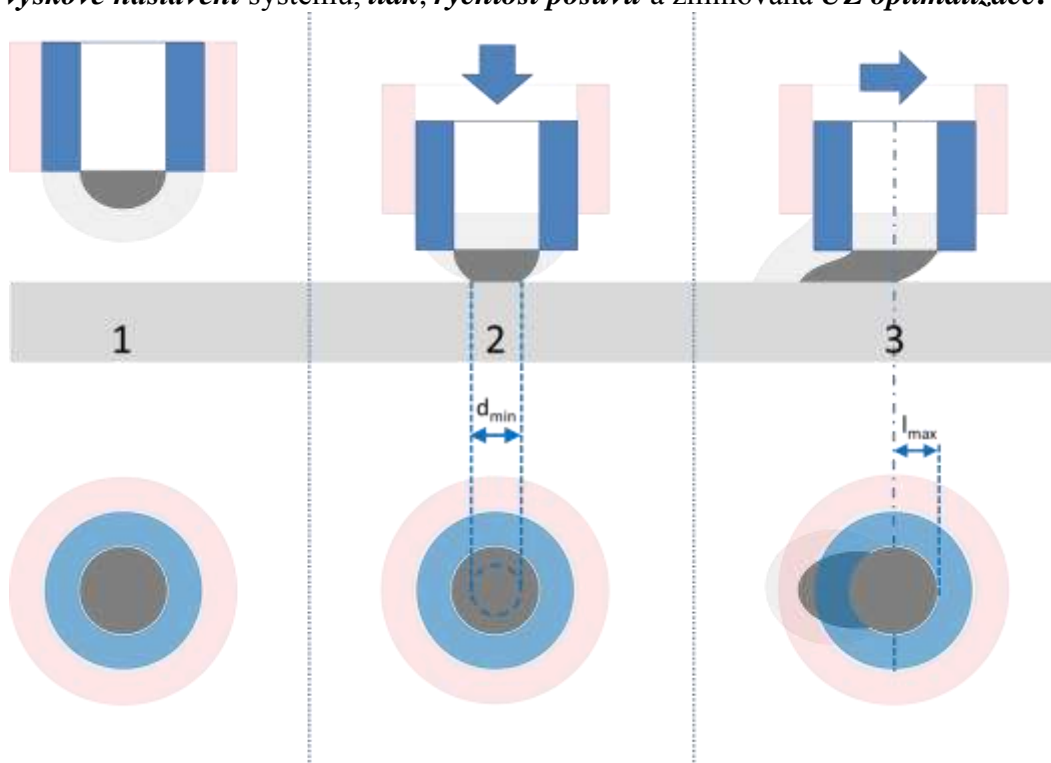
Adhezní podmínka je popsána na obr. 3.12, kde jsou zachyceny jednotlivé fáze výtlaku pasty z kapiláry. Tloušťka substrátu Al_2O_3 je $635 \mu m$, vnější průměr kapiláry $300 \mu m$, vnitřní $200 \mu m$. Konečný odstup kapiláry od povrchu substrátu při tisku je $115 \mu m$.



Obr. 3.12 Jednotlivé fáze výtlačku pasty, adhesní podmínka.

Obr. 3.12 uvádí tři základní fáze výtlačku pasty z kapiláry. První fáze „1“ zobrazuje vytvoření vrchlíku na konci kapiláry. Tento vrchlík zajišťuje styk požadovaného množství pasty se substrátem pro optimální adhezi pasty k substrátu a započetí tisku. S vrchlíkem souvisí fáze „2“, kde je nutné zajistit výškovým nastavením tiskové kapiláry dostatečnou vzájemnou styčnou plochu vrchlíku a substrátu pro splnění adhesní podmínky. Při dostatečné styčné ploše je při přechodu do fáze „3“ zajištěna adheze dostatečného množství dávkovaného materiálu. Ve fázi „3“ již je nutné spuštění posuvu a odpovídajícího tlaku pneumatického dávkovacího systému společně s UZ energií, která napomáhá výstupu pasty z kapiláry. Při optimální synchronizaci jednotlivých parametrů dochází k výtlačku pasty, jak je uvedeno na obr. 3.12 „3“. Synchronizace parametrů je provedena dle podmínky l_{\max} , kdy tok deponovaného materiálu nesmí opustit plochu $\frac{1}{2}$ průřezu kapiláry v místě styku se substrátem. V opačném případě by došlo k nedostatečnému výtlačku pasty a částečně by byl přerušován tištěný motiv. V případě nadměrného toku deponovaného materiálu by docházelo k ulpívání přebytku pasty na stěnách kapiláry a tištěná stopa by vykazovala nehomogenní množství naneseného materiálu.

Na obr. 3.13 jsou kombinovány dva průměry kapilár, přičemž je poukázáno na změnu poměru parametrů d_{min} a l_{max} . Rozdílné nastavení procesu sledujeme ve všech fázích. Nejedná se pouze o tlak. Podstatnou změnou nastavení je zejména **výškové nastavení** systému, **tlak**, **rychlost posuvu** a zmiňovaná **UZ optimalizace**.



Obr. 3.13 Redukce průměru kapiláry, vliv na adhezní podmínku

Tiskové parametry odvozené od **průměru kapiláry**, **povrchu substrátu** a **reologických vlastností nanášeného materiálu** je možné kategorizovat do určitých intervalů hodnot. Jedná se o parametry tiskového procesu (viz. tabulka 1, kapitola 2.4.1), které je možné v daných intervalech přizpůsobit dle aplikace.

Vzdálenost kapilára – substrát

Tato vzdálenost je nastavena dle požadované šířky tištěné čáry, kdy výška vrchlíku tištěné stopy je přibližně 2/3 vzdálenosti kapiláry od substrátu.

Tlakové poměry

Tlak pneumatického dávkovacího systému je vhodné při rozlišení pod 100 μm udržovat na velmi malých hodnotách do 1,5 atm, kdy ultrazvukové energie v případě vnitřních průměrů transportních kapilár do 50 μm umožňuje znatelně rychlejší výtlač média.

Pohyb v osách X, Y, Z

Trajektorie není kopií požadovaného motivu. Komplexní tisková data jsou tvořena kombinací základní **trajektorie** a **speciálně generovaných dat** pro určitá místa v požadovaném motivu (rohy, oblouky, zakončení, apod.) Tato odlišnost je oproti běžným tiskovým úlohám zavedena z důvodu tisku velmi malých objemových dávek. Za těchto okolností dochází k ovlivnění výtlačku pasty a jejímu následnému toku samotnou soudržností dávkovaného materiálu, respektive povrchovým napětím.

3.5.2 Shrnutí kapitol 3.3, 3.4 a 3.5.

Kapitoly popisují princip nové metody optimalizace reologických poměrů dávkovaného média v transportní kapiláře v oblasti jejího vyústění. Dále popisují rostoucí vliv jednotlivých parametrů tiskového procesu s klesajícím objemovým množstvím dávkovaného média na výsledný tištěný motiv. Součástí je také základní simulace tokových křivek během procesu tlakové dispense. S použitím kapilár s různým vnitřním průměrem je popsána adhesní podmínka v souvislosti s průměrem kapiláry a objemem pasty.

3.6 První vývojový stupeň ultrazvukové jednotky – UZD1



Obr. 3.14 Sestava UZD1

Požadavky:

Na základě prvních teoretických předpokladů byl vytvořen model UZD1, který je složen ze statické základny, kompaktního zásobníku a rezonančního systému vedoucího ke kapiláře. Toto jednoduché řešení bylo vytvořeno z důvodu *jednoznačného ověření principu*.

3.6.1 Návrh modelu UZD1

Piezokeramické rezonátory

Základní funkční součástí UZD jsou piezokeramické rezonátory. Za účelem vývoje tohoto zařízení byla navázána spolupráce s firmou Noliac Ceramics s.r.o. Byl proveden průzkum vlastností jednotlivých materiálů a vzhledem k parametrům požadovaných aplikací byl zvolen univerzální materiál Noliac NCE 80. Tento materiál je volen zejména z hlediska poměru roztažnosti, přivedeného napětí, kompaktních rozměrů a stability parametrů. [16], [18]

Uspořádání systému

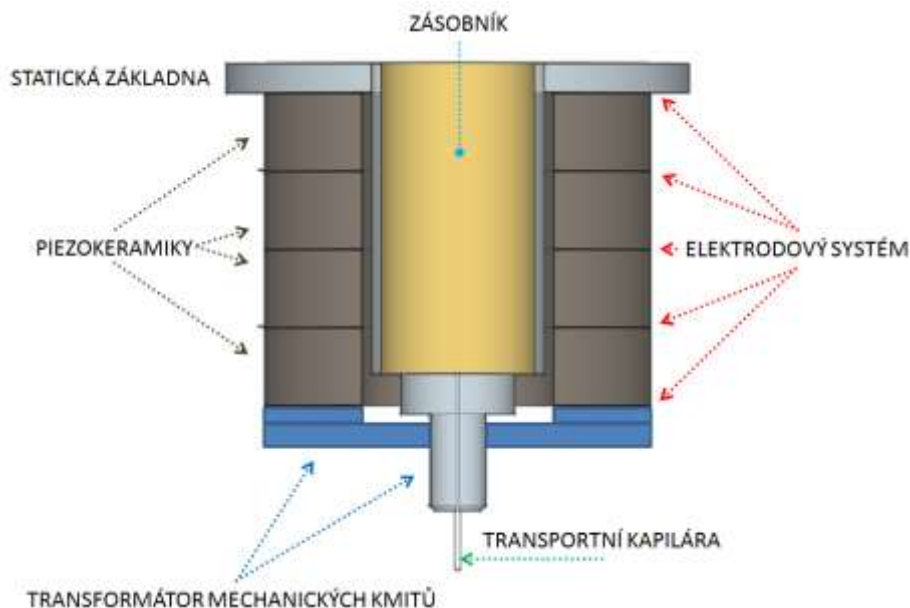
Pro samotnou konstrukci sestavy s uzlem a kmitnou je zapotřebí vytvořit statickou základnu pro rezonanční systém, která je s kmitnou spojena mechanickou soustavou umožňující požadovanou změnu rozměrů. Vzhledem k povaze mechanických kmitů a jejich malé amplitudě v jednotkách μm není realizace mechanické konstrukce kritickou součástí.

3.6.2 Realizace UZD jednotky

Konstrukce UZD jednotky

Statickou základnu tvoří kovová podložka, která je spojena s mosazným zásobníkem pájeným spojem. Výstup zásobníku je uzavřen měděným plechem o tloušťce $150\ \mu\text{m}$, který je také přiletován. Plechová membrána je ve svém středu opatřena výstupním otvorem o průměru přibližně $1000\ \mu\text{m}$, který slouží pro vsazení kapiláry o průměru $750\ \mu\text{m}$ v membráně fixované dvousložkovým epoxidem. Kapilára

byla osazena metrickým šroubem M3 provrtaným v ose průměrem 1000 μm . Šroub je na kapiláru nalepen pomocí dvousložkového epoxidu.

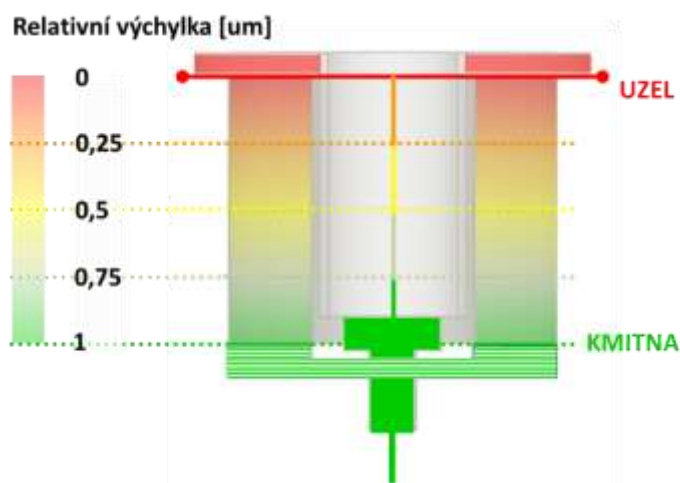


Obr. 3.15 Návrh modelu UZD1

Piezokeramické rezonátory jsou sériově navlečeny na zásobník, ale elektricky jsou zapojeny paralelně. Mezi jednotlivé piezokeramiky jsou vloženy plechové elektrody o tloušťce 40 μm , zajišťující jejich kontaktování. Celek je poté uzavřen kovovou přírubou, která je vnitřním závitem M3 fixována na šroub. Sestava je tak mechanicky spojena v rezonanční systém, kde uzel je tvořen statickou základnou. Od této základny směrem ke koncové přírubě narůstá hodnota výchylky, přičemž samotná příruba reprezentuje kmitnu systému. Vzhledem k pevnému mechanickému spojení příruby s kapilárou pak právě kapilára kmitá s výchylkou, jež odpovídá přibližně výchylce příruby.

Popis chování systému

Navržený model je uveden na obr. 3.15 s popisem základních částí. Obrázek znázorňuje polohu *UZLU* a *KMITNY* doplněnou o barevnou škálu popisující hodnotu relativní výchylky v dané pozici.



Obr. 3.16 Znázornění nárůstu hodnoty relativní výchylky se vzrůstající vzdáleností od UZLU / UZD1

Budicí systém

Budicí systém pro realizaci prvního vývojového stupně UZD1 byl tvořen pouze generátorem HP 8116 A. Budicí signál byl funkce sinus, $U = 10V_{p-p}$ s frekvencí přibližně 13,2 KHz. Rezonanční frekvence je indikována úbytkem na sériovém odporu.

Test přenosu kmitů byl proveden na základě kontaktní rezonanční zkoušky přenosu kmitů na kovovou tyčinku. Přeladováním generátoru byla sledována hodnota úbytku napětí na sériovém odporu a zároveň testován přenos vibrací na kontaktní zkoušce.

3.6.3 Shrnutí dosažených výsledků s UZD1

Na základě kontaktního testu rezonance bylo ověřeno dosažení přenosu kmitů s vysokou účinností až na transportní kapiláru, kde dochází k ovlivnění pasty. Konstrukční řešení UZD1 bylo svou jednoduchou konstrukcí určeno výhradně pro ověření principu. Právě jednoduchost konstrukce byla na úkor použitelnosti hlavice v běžném dispensním procesu. Z tohoto důvodu neumožňoval systém UZD1 jednoduchou záměnu kapiláry za účelem navýšení rozlišení. Univerzálnost řešení vyžaduje učinit kompromis mezi efektivitou přenosu ultrazvukové energie a možností použití standardních dílů (zásobníku a transportní kapiláry).

3.7 Druhý vývojový stupeň ultrazvukové jednotky – UZD2

Požadavky:

Realizací prvního vývojového stupně UZD1 bylo docíleno ověření principu. Podstatou druhého vývojového stupně UZD2 je konstrukční uspořádání UZD hlavice umožňující její aplikaci v dispensním zařízení pro testování tisku za běžných podmínek (automatizované posuvy, řízení tlaku a kontinuální tisk).

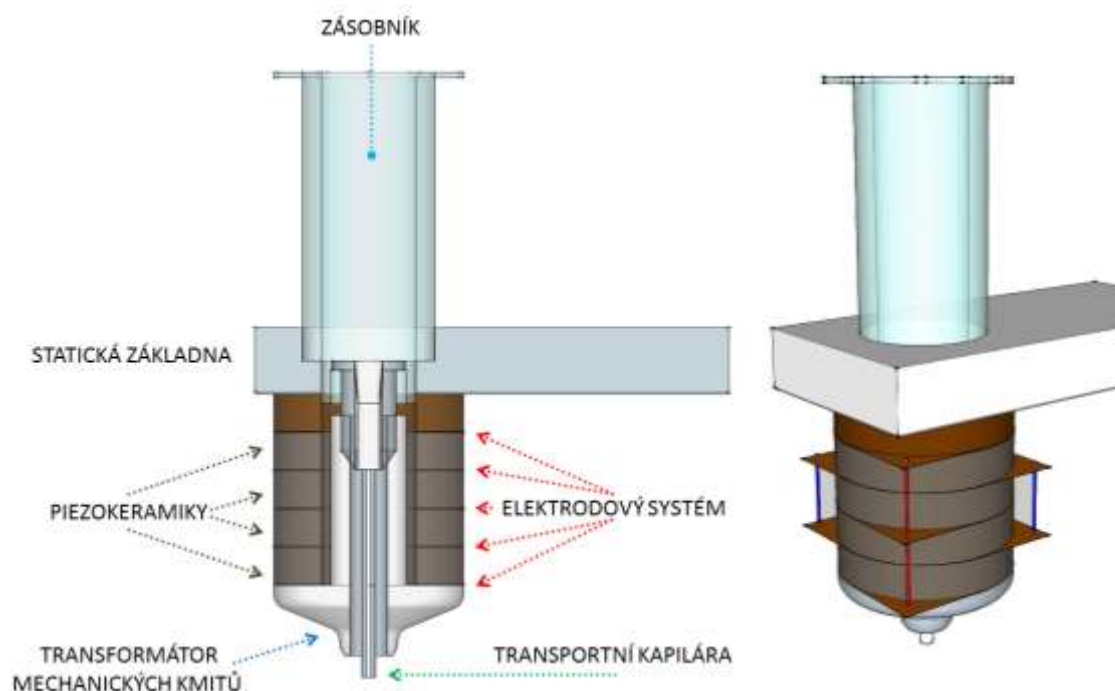
3.7.1 Návrh modelu UZD2

Piezokeramické rezonátory

Provedení UZD2 využívá stejné piezokeramické rezonátory i uspořádání jako stupeň UZD1.

Uspořádání systému

Duralová základna UZD2 v tomto případě již musí být mechanicky přizpůsobena z hlediska využití standardního zásobníku (plastové kartuše a výstupní jehly). Ze spodní strany k základně doléhá elektroizolační podložka z materiálu *textit*, která zajišťuje jak mechanickou tuhost, tak elektrické oddělení duralové základny od elektrody rezonančního systému. Rezonanční systém je mechanicky sevřen pomocí transformátoru mechanických kmitů v provedení speciálně tvarované matice dotažené na upravenou výstupní kapiláru. Mechanické provedení tak využívá standardně využívaných komponent dispensních systémů, je však očekáván přenos mechanických kmitů na transportní kapiláru s vyšším útlumem. Model návrhu UZD2 je uveden na obr. 3.17.

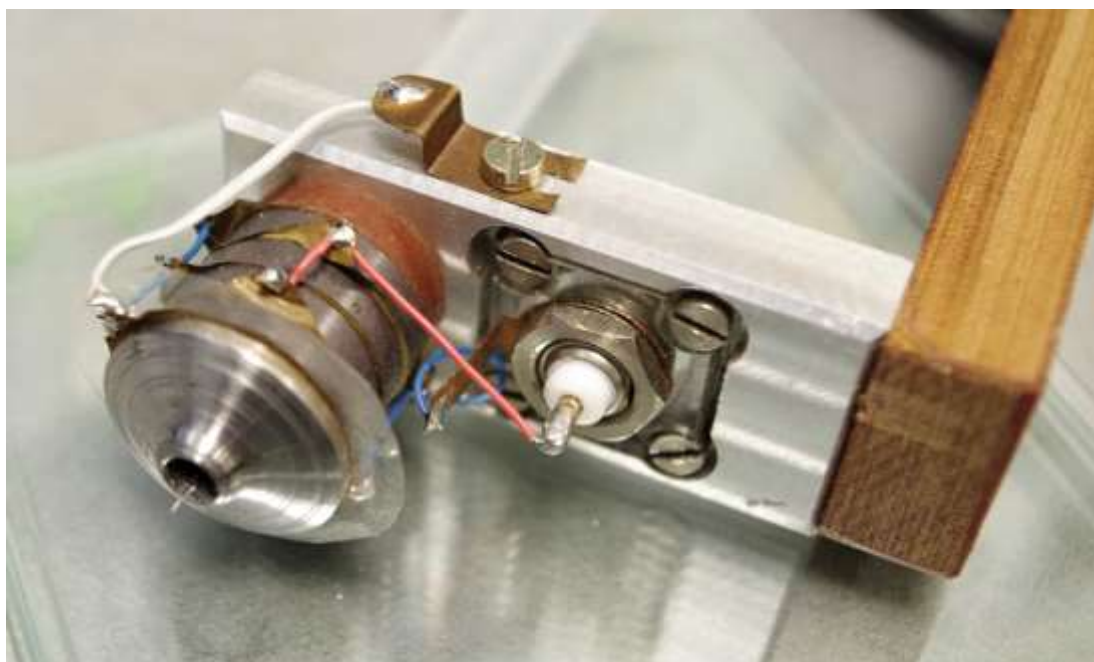


Obr. 3.17 Návrh modelu UZD2

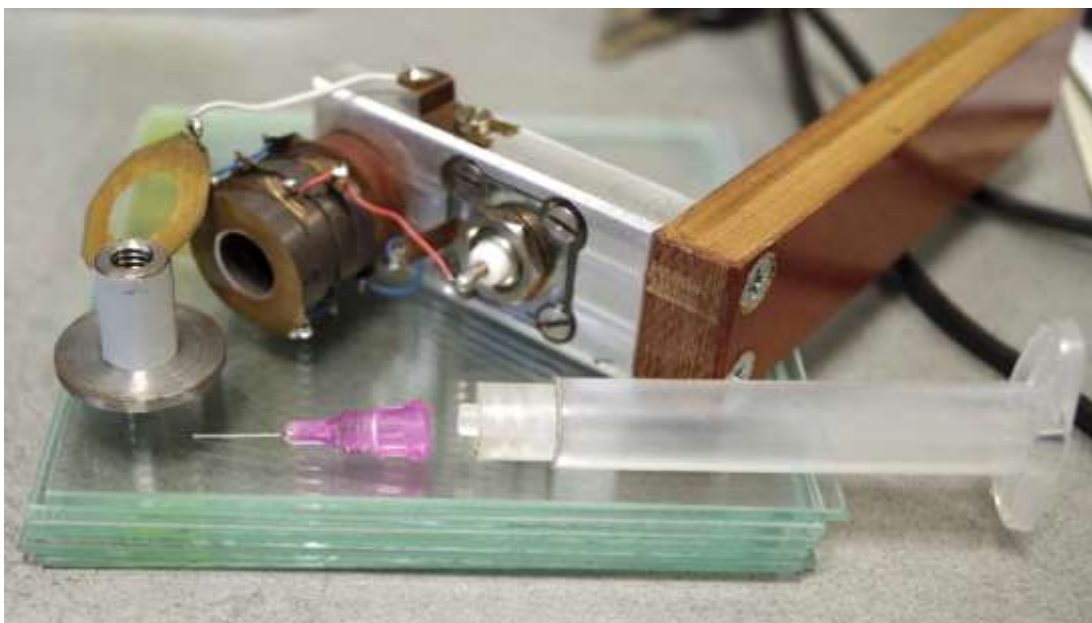
3.7.2 Realizace UZD2

Konstrukce UZD jednotky

Statickou základnu tvoří duralový blok, který slouží zároveň jako nosný prvek pro celý systém (obr. 3.18). Kolmo je spojena s upevňovacím dílem do konzole na dispensním robotu. V těle základny je zapuštěn BNC konektor pro připojení budicího signálu (elektricky izolovaný od základny). Vodiče propojují kladný (červené) a záporný (modré) pól rezonančního systému. Šedým vodičem je elektricky propojen transformátor mechanických kmitů se základnou.



Obr. 3.18 Realizace UZD2, detail připojení signálu



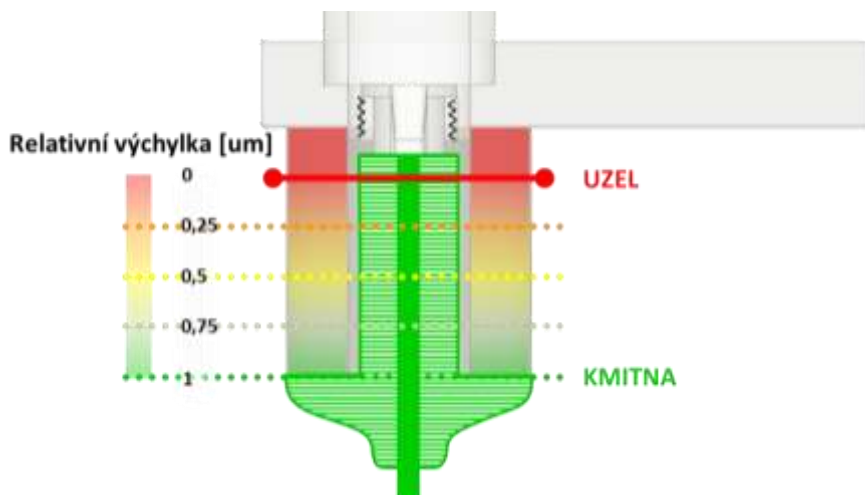
Obr. 3.19 Rozložená přenosová část mechanických kmitů

Obr. 3.19 zobrazuje slabé místo univerzálního řešení UZD2, které je způsobeno zejména plastovými součástmi přenosového systému. Transformátorová matice je opatřena vnitřním závitem, do kterého je zašroubována kapilára. V plastovém těle kapiláry je vyřezán závít, který ji fixuje do transformátoru. Kapilára je dále standardně fixována hrubým závitem do kartuše, což také představuje slabou část řešení.

Popis chování systému

Systém z hlediska funkce zaznamenal hlavní změnu v provedení transformátoru mechanických kmitů, který přenáší mechanické kmity na kapiláru ukotvenou uvnitř rezonančního systému. Uspořádání má hlavní výhody z hlediska možnosti použití kartuše s velkým objemem (průměr zásobníku), protože rezonanční systém je umístěn až na jeho výstupu.

Systém při testech vykazuje přenosy mechanických kmitů, ale systém kmity velmi utlumuje a není tak přenesena dostatečná energie z hlediska efektivity ultrazvukové podpory výtlaku pasty.

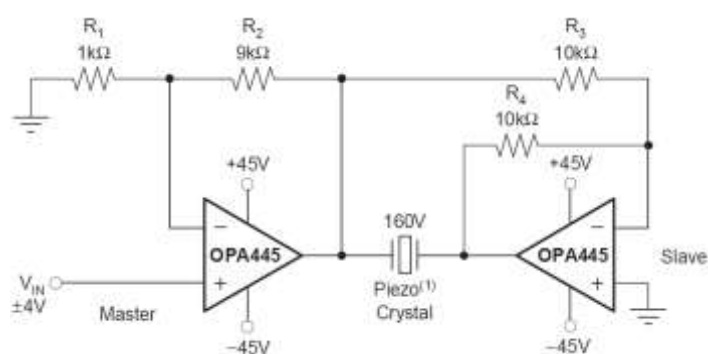


Obr. 3.20 Znáznornění nárůstu hodnoty relativní výchylky se vzrůstající vzdáleností od UZLU / UZD2

Budicí systém

Pro výkonové buzení je třeba zařadit mezi generátor signálu a rezonanční systém zesilovač, který umožňuje zesílení signálu s frekvencí do 100 kHz a amplitudou nad 100 V_{p-p}. Zvolil jsem můstkové zapojení se zdvojovačem napětí určené pro piezokrystaly. Základní funkční součástí zapojení je operační zesilovač OPA 445AU. Optimální napájecí napětí pro tyto operační zesilovače je $V_s = \pm 40$ V, se kterým je možné teoreticky dosáhnout výstupního napětí ± 80 V. Pro účely buzení UZD2 je prozatím dostatečné provozovat rezonanční systém s napětím ± 15 V, kdy se jedná zejména o bezpečnost testovacího provedení.

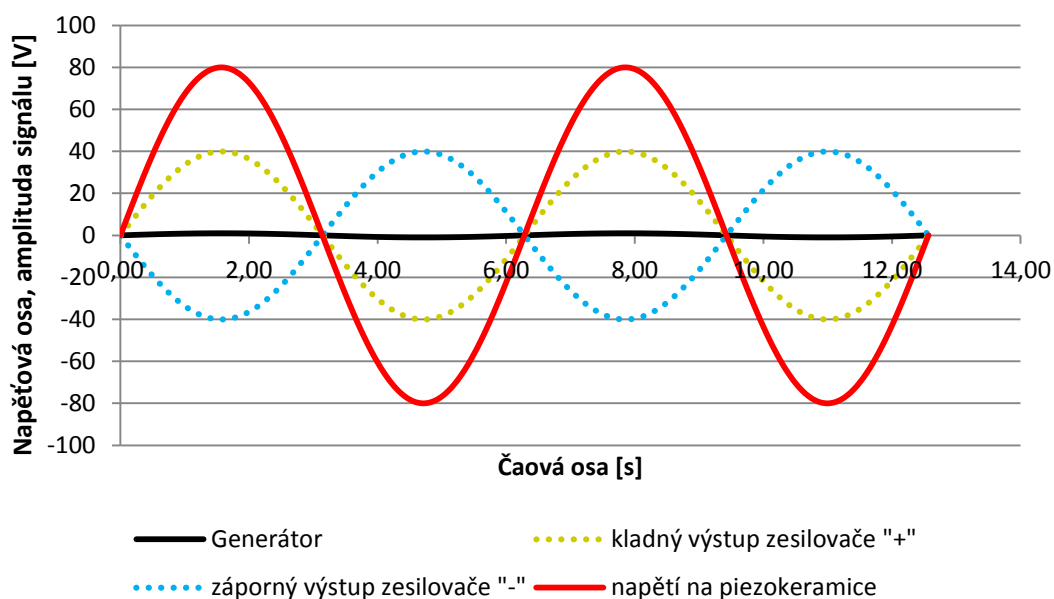
Zapojení bylo použito dle doporučení výrobce (obr. 3.21), které plní požadovanou funkci. Jako zdroj vstupního signálu je použit generátor DSO 3102A, čímž je umožněno pro podmínky testů libovolně pracovat se zdrojovým budícím signálem. Vzhledem k průběžným úpravám konstrukce je tato možnost optimální.



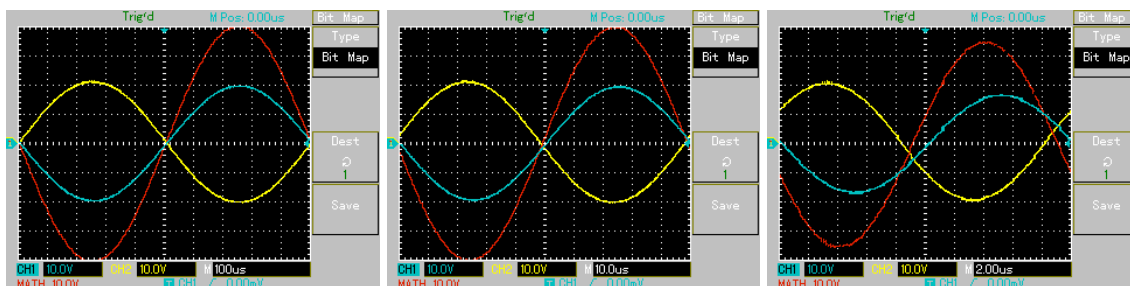
Obr. 3.21 Můstkové zapojení se zdvojovačem napětí [21]

Následující obrázek obr. 3.22 zobrazuje průběhy jednotlivých signálů v zapojení s OPA 445, přičemž zelený průběh je výstupní napětí přivedené na rezonanční systém.

Znázornění funkce zesilovače signálu s využitím operačního zesilovače OPA 445



Obr. 3.22 Průběhy signálu zdvojovače napětí s OPA 445



Obr. 3.23 Měření výstupního signálu zesilovače – fázový posuv
(1 kHz, 10 kHz, 50 kHz), ($U=2V_{pp}$, $U_{nap}=24V$, $U_{out}=77V$)

3.7.3 Shrnutí dosažených výsledků UZD2

Kontaktní test provedený na funkčním vzorku UZD2 indikuje vyšší útlum než u provedení UZD1. Výtlač pasty byl však velmi málo ovlivněn a z toho důvodu bylo nutné přistoupit ke změně dispensního ústrojí od vyústění ze zásobníku. Transformátor mechanických kmitů potřebuje mechanicky tužší spojení kapiláry s dispensní kartuší, aby docházelo k rozměrové deformaci transportní kapiláry samotné. Přemístění zásobníku nad rezonanční systém a vnoření mechanického transformátoru do rezonančního systému naopak bylo zachováno v dalším vývojovém stupni UZD3. Kombinace těchto poznatků byla zapracována při vývoji UZD3.

3.8 Třetí vývojový stupeň ultrazvukové jednotky – UZD3

Požadavky:

Realizací druhého vývojového stupně UZD2 bylo nalezeno vhodné mechanické uspořádání jednotlivých součástí UZD, ale vyplynuly požadavky na úpravu dispensního ústrojí. Hlavní změna se týká transportní kapiláry a její fixace na dispensní zásobník. Provedení UZD3 však přináší novou konstrukci všech dílů, které reflektují poznatky z předchozí verze.

3.8.1 Návrh modelu UZD3

Piezokeramické rezonátory

Piezokeramické rezonátory, elektrody i jejich propojení zůstává beze změny. Typ Noliac NCE 80, kontaktovací elektrody z měděného plechu o tloušťce 40 μm vzájemně propojeny pájenými kontakty.

Uspořádání systému

Podstatné změny v uspořádání systému se týkaly zejména části v oblasti výstupu dispensního zásobníku. Zde bylo zapotřebí zajistit konstrukční uspořádání umožňující spojení výstupu zásobníku a dílu představující statický díl se zajištěním fixace transportní kapiláry. Náhled na provedení UZD3 uvádí obr. 3.28. Provedení samotného dílu se věnuje následující kapitola.

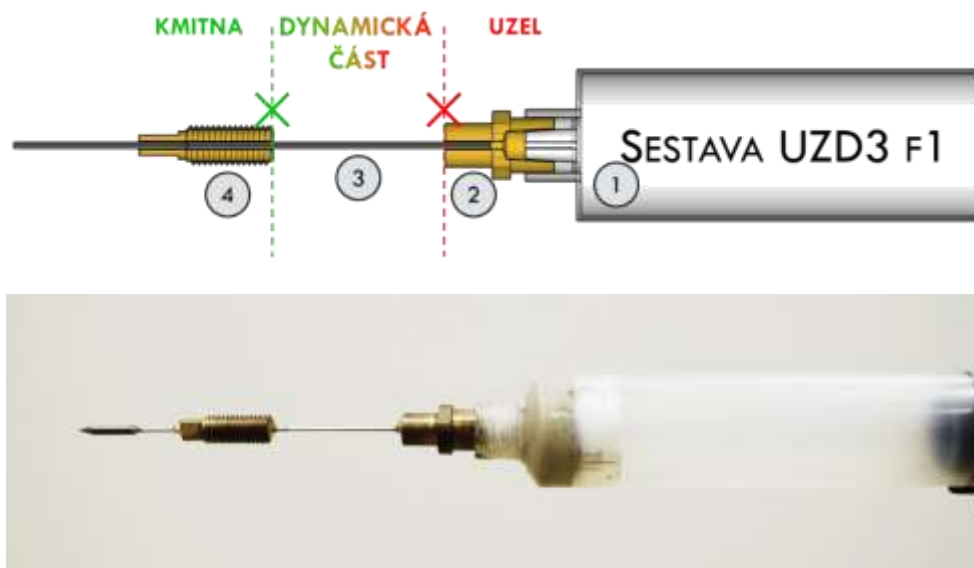
3.8.2 Realizace UZD3

Konstrukce UZD jednotky

Pro provedení UZD3 byl proveden kompletně nový návrh konstrukce. Tato změna umožnila zachování možnosti umístění UZD jednotky na samotném výstupu dispensního zásobníku a zároveň zajištění efektivitu přenosu mechanických kmitů na transportní kapiláru. Jednotlivé fáze složení sestavy UZD3 znázorňuje obr. 3.29, kde jednotlivé součásti sestavy jsou označeny čísly – viz. Tabulka 4.

Sestava UZD3 F1 – Základní sestava

V první fázi je výstup zásobníku (1) osazen přírubou (2), do které je vlepena dvousložkový epoxidem ocelová kapilára (3). Tato kapilára je v určité vzdálenosti osazena šroubovou přírubou (4). Po kompletaci sestavy bude představovat z hlediska rezonančního systému příruba (2) UZEL, šroubová příruba (4) KMITNU a transportní kapilára (3) DYNAMICKOU ČÁST zajišťující mechanické spojení uzlu a kmitny.



Obr. 3.24 Sestava UZD3, fáze 1 - základní sestava, Model / Funkční vzorek

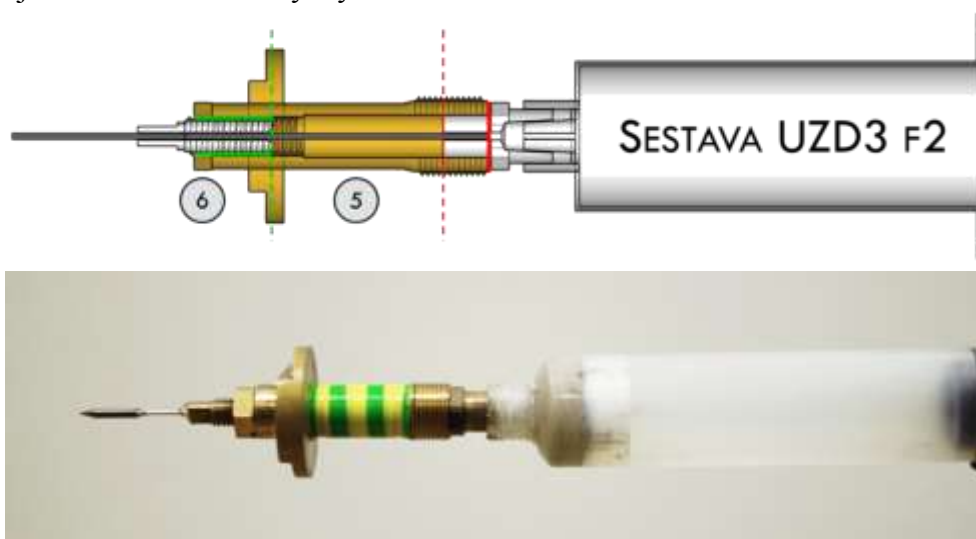
Funkční vzorek oproti modelu je v konečné fázi vybaven kapilárou redukující vnitřní průměr na 42 μm . Pro konečné řešení jsem se rozhodl využít kontaktovací kapiláry určené pro wire bonding, které poskytují výbornou geometrickou přesnost a hlavně požadovaný vnitřní průměr.

Sestava UZD3 F2 – Transformátor mechanických kmitů

Fáze druhá sestavu doplňuje o transformátor mechanických kmitů (5) a aretační matici (6). Transformátor mechanických kmitů zároveň zajišťuje mechanické předepnutí rezonančního systému. Tyto součásti slouží pro uložení piezokeramik a jejich mechanické předepnutí. Transformátor (6) je pomocí vnitřního závitu spojen s fixační přírubou (4) a je utažen z důvodu napnutí transportní kapiláry. Kontramatice (6) slouží pro aretaci polohy transformátoru mechanických kmitů.

Styčné plochy zajišťující pevné mechanické spojení jednotlivých komponent jsou barevně vyznačeny. Červená barva vyznačuje komponenty odpovídající styčné ploše

se statickým charakterem. Zelená barva naopak vyznačuje styčné plochy komponent s největší mechanickou výchylkou.



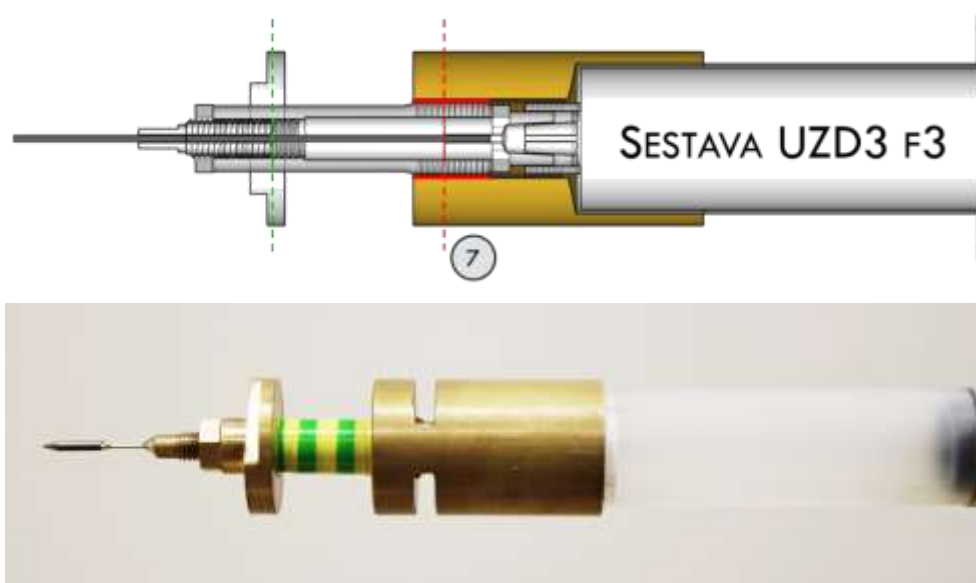
Obr. 3.25 Sestava UZD3, fáze 2 - transformátor mechanických kmitů, Model / Funkční vzorek

Funkční vzorek UZD3 F2 má izolovaný transformátor mechanických kmitů z důvodu elektrického oddělení od elektrod piezokeramického systému.

Sestava UZD3 F3 - Pouzdro

Fáze třetí doplňuje mosazné pouzdro (7), které v mechanické konstrukci představuje statickou základnu. Sestava UZD3 F3 již reprezentuje kompletní mechanické provedení konstrukce pro rezonanční jednotku, přičemž pouzdro pro dispensní zásobník (7) je fixováno jak na transformátor mechanických kmitů (5), tak na samotný dispensní zásobník (1).

Pouzdro je přes červeně vyznačený závit pevně spojeno s transformátorem mechanických kmitů (5) a pro rezonanční systém tak přebírá funkci UZLU. Vnitřní závit v mosazném pouzdře dále fixuje běžně používané dispensní zásobníky, které jsou opatřeny závitem.

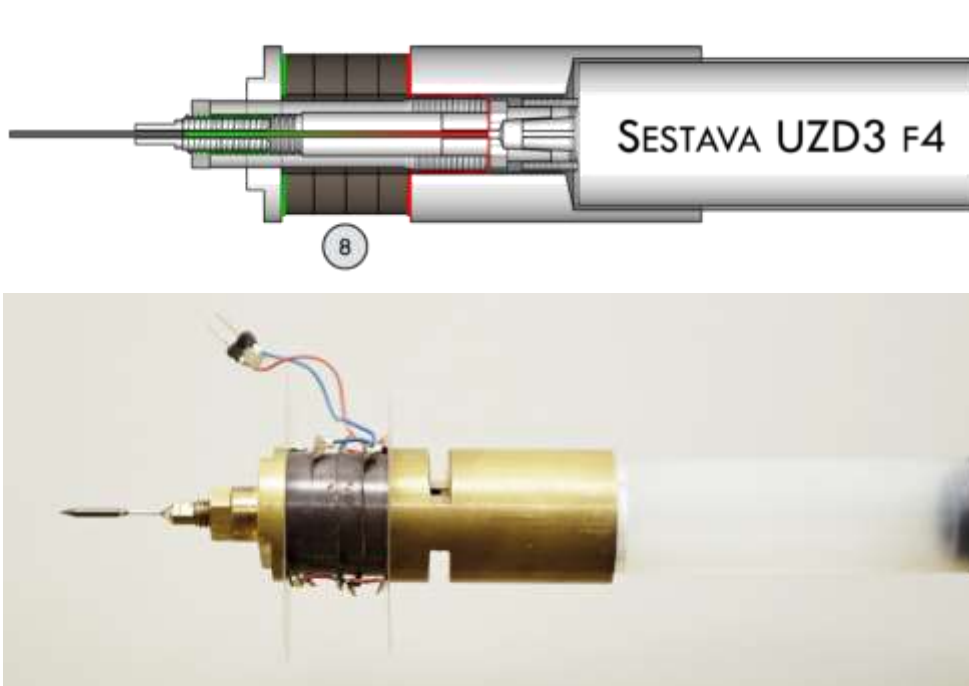


Obr. 3.26 Sestava UZD3, fáze 3 - Pouzdro, Model / Funkční vzorek

Mosazné pouzdro (7) UZD F3 je oproti modelu opatřeno frézovanými drážkami, které umožňují aretaci výstupní příruby (2) dispensního zásobníku (1).

Sestava UZD3 F4 – Piezokeramické rezonátory

Ve čtvrté fázi je systém doplněn o piezokeramické rezonátory (8), které jsou zdrojem mechanických kmitů a jejich celková výchylka, jenž je akumulována od statického bodu (červeně) do kmitny (zeleně), způsobuje deformaci transportní kapiláry (3).

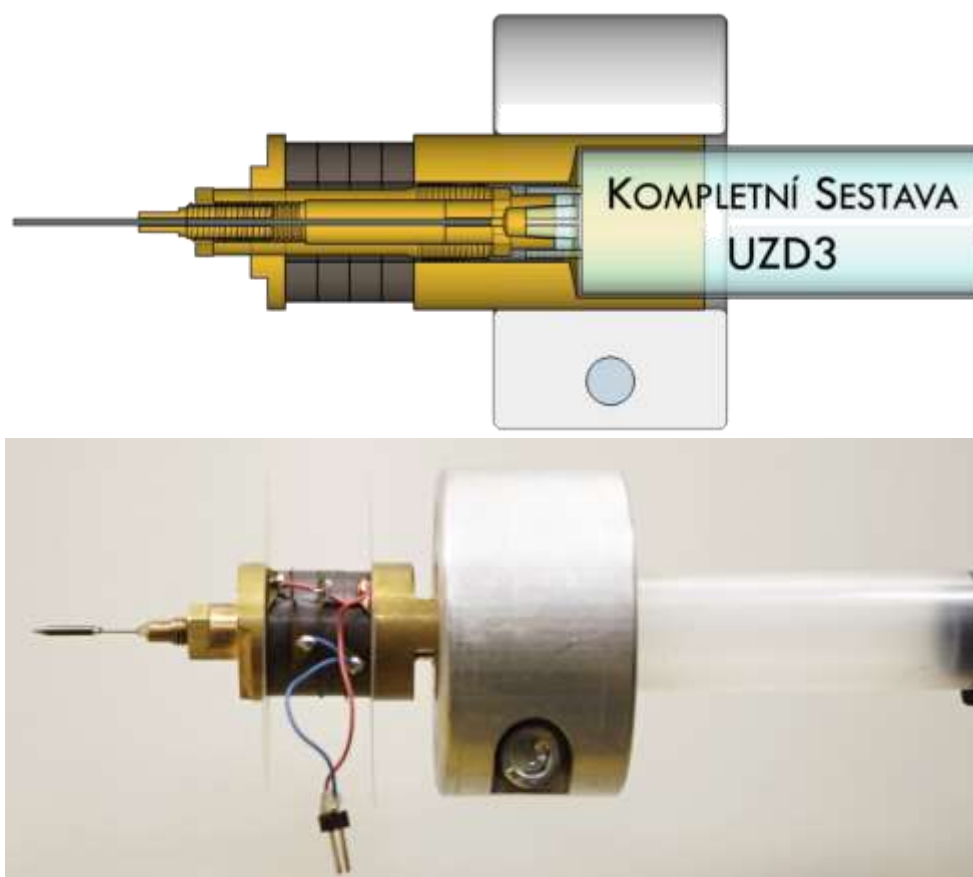


Obr. 3.27 Sestava UZD3, fáze 4 - Piezokeramické rezonátory, Model / Funkční vzorek

Funkční vzorek UZD3 F4 obsahuje vývody z elektrodového systému s konektorem pro připojení vstupního signálu.

Sestava UZD3 Kompletní sestava

Tato konstrukce ve výsledné podobě (obr. 3.28, obr. 3.30) umožňuje využití standardních dispensních zásobníků, ale z důvodu efektivity přenosu mechanických kmitů je nutné využití speciální kapiláry. Z hlediska rozlišení dávkovací metody však standardně nejsou k dispozici kapiláry o průměrech pod 100 μm , čímž je univerzálnost tohoto řešení prakticky maximální, kdy jsou využity všechny prvky dispensního systému. Tyto jsou pouze doplněny o speciální hlavici umístěnou na výstup dispensního zásobníku.

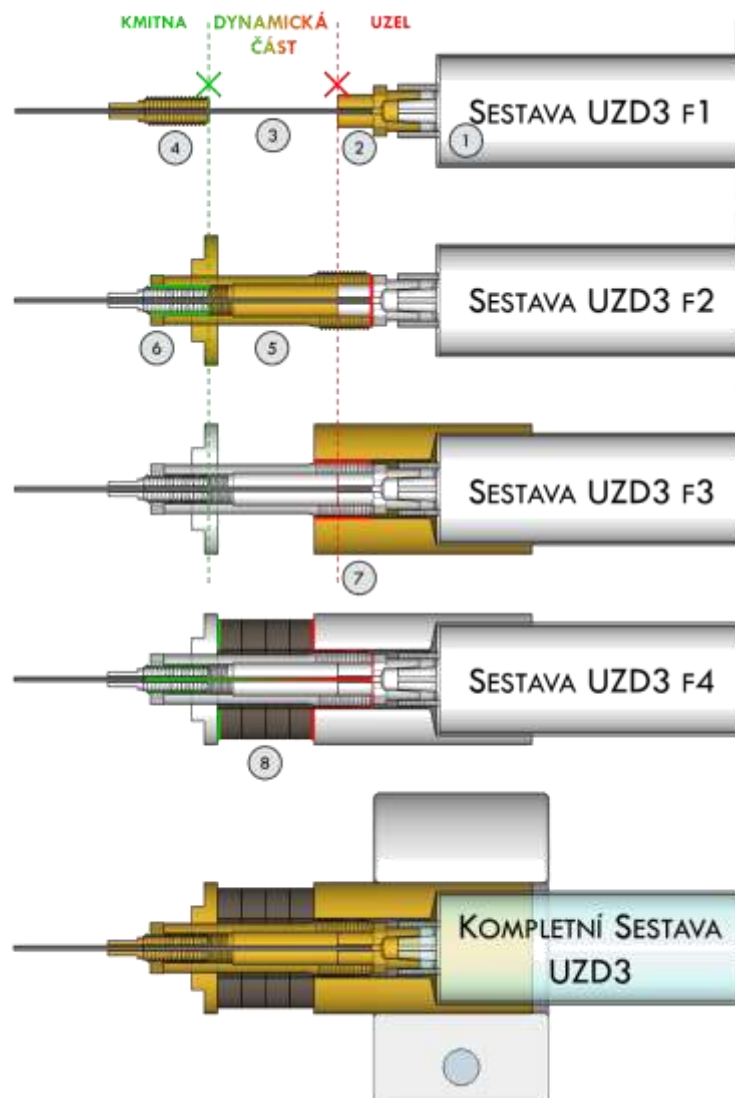


Obr. 3.28 Kompletní sestava UZD3, Model / Funkční vzorek

Kompletní sestava uvedená obr. 3.28 je osazena duralovou konzolí, která je přizpůsobena pro montáž na dispensní robot Fisnar F4200N. Tím je umožněno testovat hlavici ve standardním dispensním procesu.

Tabulka 4 Označení součástí UZD3

Číslo	Součást
1	Dispensní zásobník
2	Mosazná výstupní příruba dispensního zásobníku
3	Ocelová transportní kapilára
4	Mosazná příruba pro spojení transportní kapiláry (3) a transformátoru mechanických kmitů (5)
5	Mosazný transformátor mechanických kmitů a šroub pro předepnutí piezokeramických rezonátorů (8).
6	Mosazná aretační matice
7	Mosazné pouzdro sloužící jako statická základna prostřednictvím jeho fixace k transformátoru mechanických kmitů (5) a dispensnímu zásobníku (1).
8	Piezokeramický rezonanční systém



Obr. 3.29 Kompletace sestavy UZD3



Obr. 3.30 Výsledná realizace modelu UZD3

Popis chování

Obr. 3.30 znázorňuje testované provedení ultrazvukové hlavice, jejíž funkce je následující. *Piezokeramické rezonátory* (8) jsou sevřeny a předejaty mezi *pouzdem pro dispensní zásobník* (7) a *transformátorem mechanických kmitů* (5). Tyto dvě součásti mechanické soustavy jsou dále propojeny přes mechanické komponenty (obr. 3.25, obr. 3.26, obr. 3.27) až na transportní kapiláru, která je vlivem mechanických kmitů dynamicky deformována a tuto deformaci využívám pro přenos energie na nanášený materiál.

Jak je popsáno v kapitole 3.3, lze prostřednictvím mezní vrstvy ultrazvukovou energii využít pro úpravu reologických parametrů nanášeného materiálu.

Budicí systém

Budicí systém nedoznal změn v zesilovači signálu vedoucího z generátoru a to vzhledem ke stavu hlavice. Vzhledem ke stádiu konstrukčního provedení není prozatím možné definovat rezonanční frekvenci finálního systému, a z tohoto důvodu je jako zdroj signálu nadále využíván generátor s možností nastavení libovolného průběhu buzení. Tento signál je poté zesílen již zmiňovaným provedením s OPA 445AU v kapitole 3.7.2. Piezokeramický rezonanční systém (8) je buzen střídavým signálem s průběhem sinus. Frekvence budicího signálu je závislá na mechanické konstrukci. Proto je v rámci vývoje tato hodnota spíše orientační a v rámci jednotlivých vývojových stupňů UZD1 - UZD3 se pohybovala od 9 kHz po 28 kHz.

3.8.3 Shrnutí dosažených výsledků s UZD3

Při návrhu konstrukce UZD3 byly zohledněny poznatky z testů UZD2 a proto bylo přistoupeno ke konstrukci hlavice, jejíž součástí je také transportní kapilára. Hlavice jako celek je poté prostřednictvím kuželové dosedací plochy spojena s výstupem dispensním zásobníkem a fixována závitem, přičemž na tento spoj je kladen pouze požadavek tlakové těsnosti.

Kontaktní test provedený na funkčním vzorku UZD3 již vykazuje vysokou intenzitu přenesených mechanických kmitů na transportní kapiláru. Tento výsledek byl zajištěn zejména celokovovou konstrukcí hlavice s lepenými spoji. Pozice jednotlivých komponent umožňuje horní polohu dispensního zásobníku.

3.9 Tisk pasty s UZD3

Jako reprezentant pro tisk byla zvolena tlustovrstvová, elektricky vodivá pasta 9912-K od výrobce ESL Europe. Tuto pastu jsem vybral z důvodu jejího širokého využití pro vodivé motivy pro HIO v laboratoři mikroelektronických technologiích UMEL, VUT v Brně. Metoda ultrazvukové optimalizace tisku je schopna pracovat právě se standardními materiály pro TLV technologii, kdy umožňuje lokální vytvoření motivu s vysokým rozlišením.

Parametry tiskového zařízení

Kapilára, vnější průměr 150 μm , vnitřní průměr 75 μm . Rychlost posuvu 1200 $\mu\text{m/s}$, tlak pneumatického systému 1,2 atm, vzdálenost kapilára – substrát 50 μm .

Následující obrázky (obr. 3.31, obr. 3.32) dokumentují vliv UZD hlavice na tisk pasty. V průběhu tisku byly všechny nastavované parametry neměnné, docházelo pouze aktivaci/deaktivaci UZ podpory.

Obr. 3.31 dokumentuje situaci, kdy v zelené oblasti byl tisk s ultrazvukovou podporou, proto je v zelené oblasti tištěná čára celistvá. Červená přerušovaná čára označuje hranici, kdy bylo vypnuto buzení UZ podpory. V červené oblasti je vidět nesouvislá tištěná čára, která je výsledkem nedostatečného výtlaku způsobeného neaktivitou buzení.



Obr. 3.31 Vliv vypnutí buzení ultrazvukové hlavice na tisk pasty

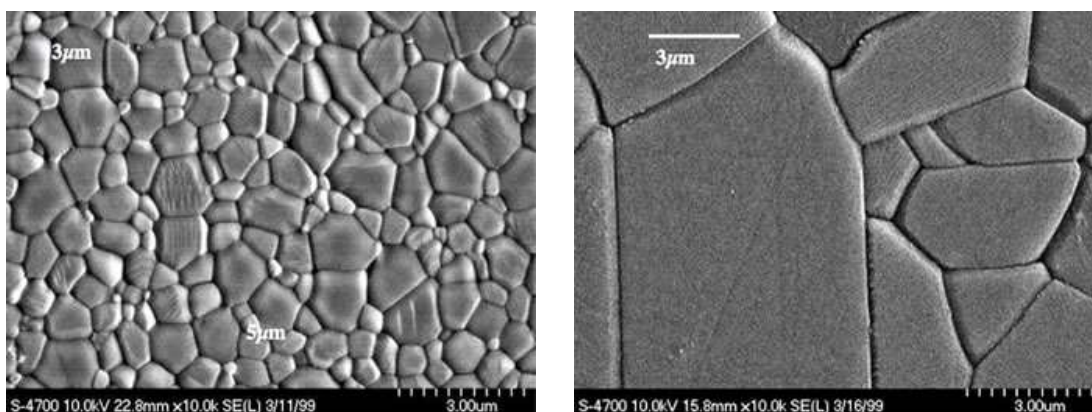
Obr. 3.32 dokumentuje situaci, kdy v červené oblasti byl pouze tisk bez ultrazvukové podpory, proto je v červené oblasti tištěná čára přerušovaná. Zelená přerušovaná čára označuje hranici, kdy bylo zapnuto UZ buzení hlavice. V zelené oblasti je vidět souvislá tištěná čára, která je výsledkem dostatečného výtlaku způsobeného navýšením efektivity tiskových parametry právě aktivním buzením hlavice.



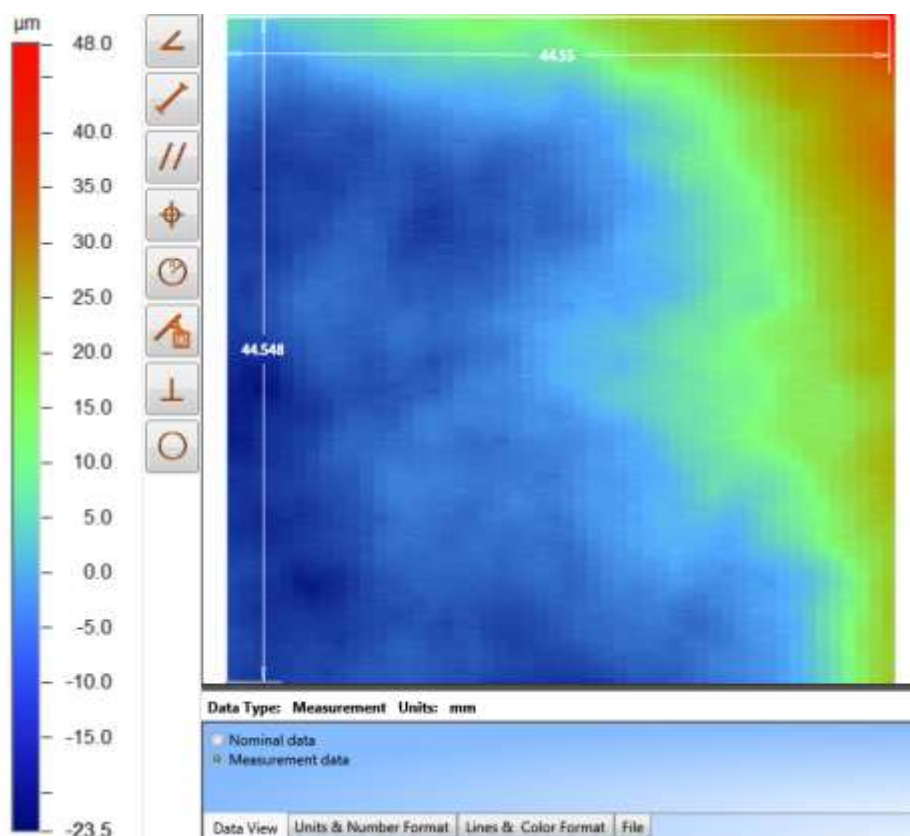
Obr. 3.32 Vliv sepnutí buzení ultrazvukové hlavice na tisk pasty

3.10 Základní substrát keramika Al_2O_3 , tloušťka $635\text{ }\mu\text{m}$

Pro tlustovrstvovou technologii jsou využívány keramické Al_2O_3 substráty komerčně dodávané společností *Ceramtec*. Obr. 3.33 zobrazuje povrchovou strukturu těchto substrátů. V jejich objemové struktuře je pnutí způsobující zakřivení materiálu vzhledem k charakteru procesu jejich výroby v rámci vysokých teplotních rozsahů.



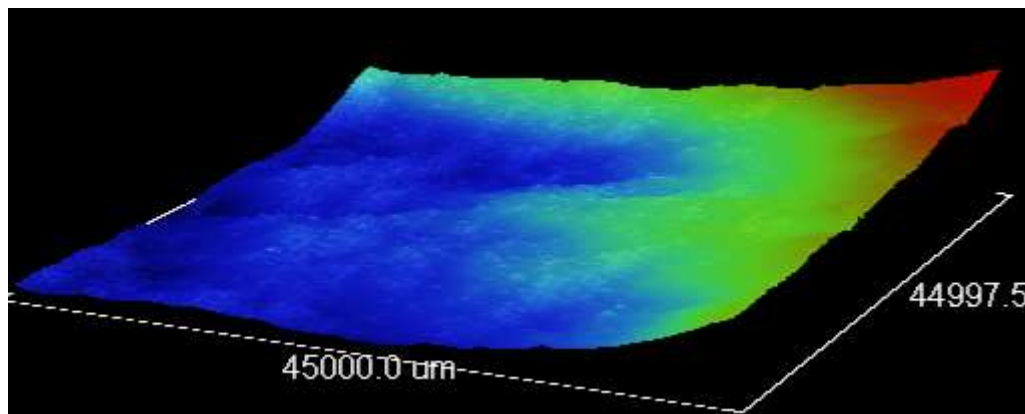
Obr. 3.33 Snímky povrchu keramických substrátů Al_2O_3 pořízené elektronovým mikroskopem. (www.ceramtec.cz)



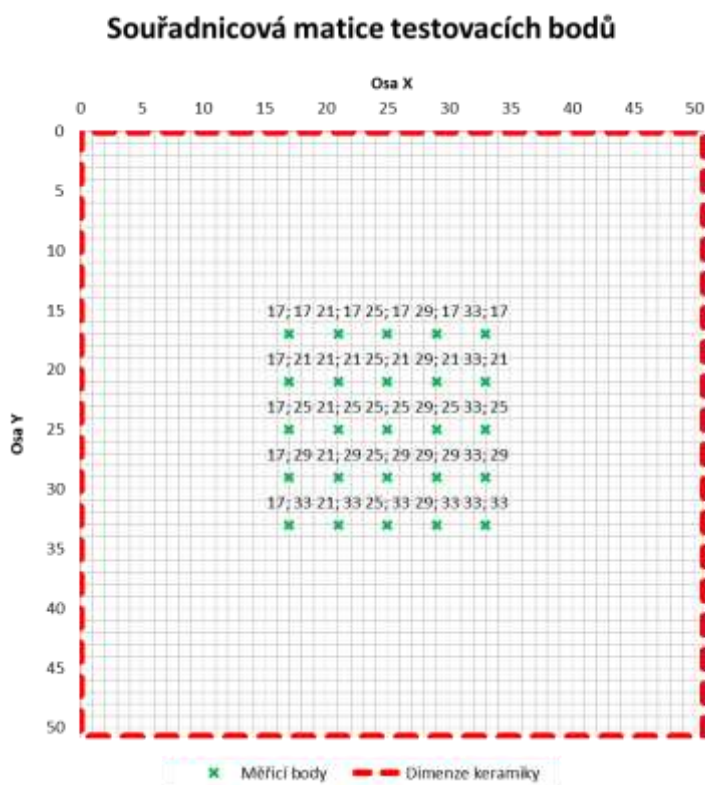
Obr. 3.34 Výsledky měření povrchové nerovnosti keramického substrátu

3.10.1 Mechanické / geometrické vlastnosti substrátů

Parametrické zkoušky UZD hlavic byly realizovány na standardně využívaných substrátech pro tlustovrstvovou technologii - materiál Al_2O_3 . Vzhledem k reálným geometrickým parametrům těchto keramických substrátů bylo zvoleno využití rozměru 50,8 x 50,8 mm místo základního přířezu 101,6 x 101,6 mm. Sníží se tím vliv plošné nerovnosti, která je vzhledem k nutnosti co nejmenší odchylky vzdálenosti *kapilára - substrát* v průběhu tisku kritická.



Obr. 3.35 3D mapa povrchu keramického substrátu



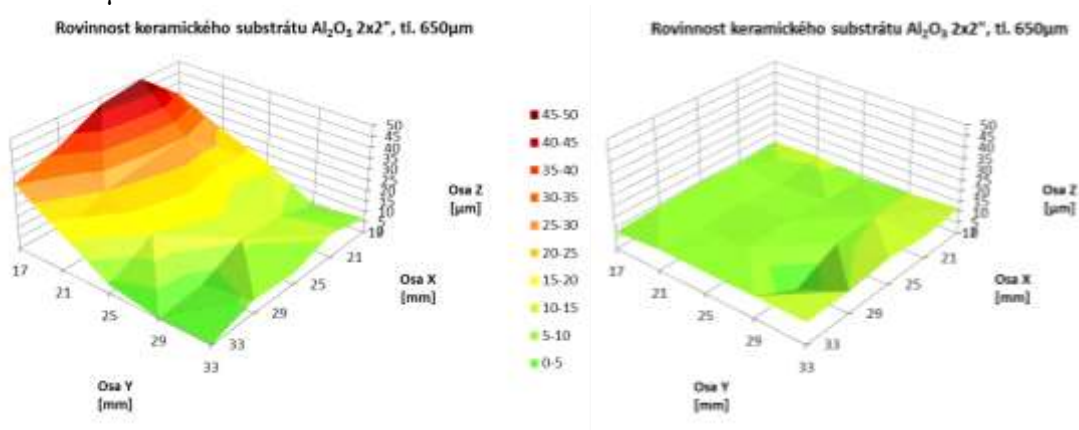
Obr. 3.36 Způsob měření nerovnosti povrchu keramického substrátu během tisku

Substrát je fixován na polohovací stolek pomocí vakua a mechanického prstence. Tento způsob fixace je ovšem závislý na rovinnosti fixačního stolku, přičemž použitý materiál (pertinax) nevykazoval potřebnou rovinnost. Mechanickou fixací bylo dosaženo maximální rovinnosti s odchylkou 30 μm . Z tohoto jsem vyrobil precizní

duralový fixační stolek s vakuovou aretací vzorku a sesazovacími kolíky (viz. kapitola 3.2.3).

3.10.2 Úpravy tiskového procesu plynoucí z nerovnosti substrátu

Duralový fixační stolek umožňuje uchycení vzorku na soustruženou plochu, čímž je zajištěna dostatečná rovinnost a planparalelnost povrchu s rovinou XY polohovacího robotu. Jedná se zejména o robustní uchycení vzorku a jeho stabilitu v řádu μm .



Obr. 3.37 Měření rovinnosti povrchu před a po softwarové kalibraci osy Z

3.10.3 Vývoj korekční jednotky pro optimalizaci trajektorie tiskové hlavičky

Pro automatickou průběžnou korekci výšky kapiláry nad substrátem je nutné vytvořit systém s mechanickou odezvou v podobě posuvu v ose Z. Korekční jednotka je navržena na principu citlivého měření tlakové odezvy na přiblížení trysky v sousedě poloze s nanášecí kapilárou. Se snižujícími se rozměry /vzdálenost kapilára – substrát/ měřitelný signál tlakové odezvy roste. Tlaková změna se změnou výšky je proto citlivá, avšak případná přítomnost již natištěných vrstev na substrátu může tuto hodnotu nežádoucím způsobem ovlivňovat.

3.10.4 Měření na profilometru

Pro ověření geometrických vlastností substrátu a potvrzení nutnosti vývoje korekční jednotky v ose Z bylo provedeno měření povrchu profilometrem BRUKER Dektak XT (obr. 3.34, obr. 3.35).

3.11 Rozlišení a parametrické vlastnosti UZ dispenseru

Z hlediska rozlišení tato metoda využívající UZD hlavici aktuálně dosahuje rozlišení čára – mezera $75\ \mu\text{m}$. Toto rozlišení je možné dosáhnout se standardní tlustovrstvovou pastou o velikosti částic do $5\ \mu\text{m}$. Dispenser je přitom osazen výstupní kapilárou o vnitřním průměru $42\ \mu\text{m}$.

Tyto parametry jsou z hlediska aktuálních potřeb výzkumných a experimentálních skupin výhodou oproti jiným běžně užívaným metodám (sítotisk, dispensing, šablonový tisk).

3.11.1 Dosažené parametry tisku

Parametry tisku dosahují stabilní šířky čáry 60 μm , kterou bylo možné bez dodatečných výškových procesních korekcí realizovat. Šířka tištěného motivu je v celé délce tisku pravidelná, s tolerancí $\pm 10\%$ tedy 12 μm . Do jisté míry lze zajistit toleranci pod $\pm 5\%$, ale přitom je třeba dodržet parametry tisku a tiskového zařízení uvedené v kapitole 2.4.

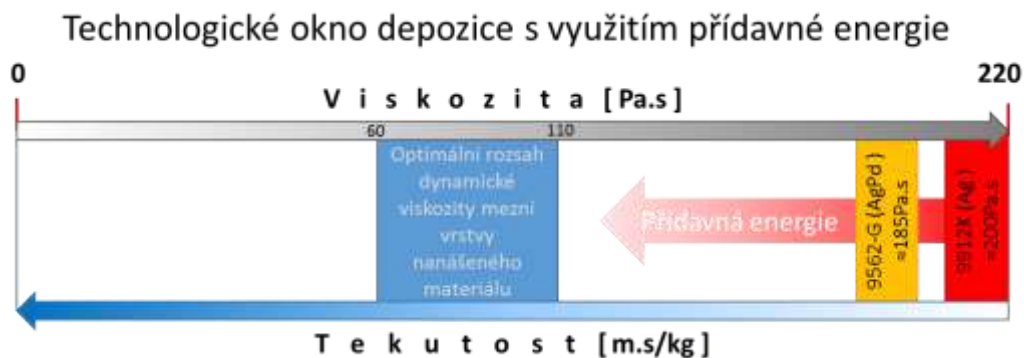


Obr. 3.38 Struktura tištěného motivu a pravidelnost jeho šířky

3.11.2 Fyzikální vlastnosti použitých past a jejich limitní rozlišení

Fyzikálně lze použité pasty popsat hlavními charakteristickými vlastnostmi jako je tixotropicitata, velikost částic, viskozita, teplotní zpracování a obsah látek. Dosažitelné rozlišení je závislé zejména na velikosti částic, od kterého se odvíjí možný použitelný průměr kapiláry (kapitola 2.4.2). Tixotropicitata, vlastnost umožňující změnu viskozity působením přídavné energie v objemu pasty, dovoluje optimalizovat jednotlivé parametry dispensního zařízení (tlak, rychlost výtlaku i polohování a vzdálenost kapiláry od povrchu substrátu) na hodnoty, které je možné v daném procesu použít.

Obr. 3.39 graficky znázorňuje oblast tlustovrstvových past v souvislosti s jejich viskozitou oproti technologickému oknu, které je teoreticky vhodné pro tisk s rozlišením, kterého je dosaženo v této práci (pod 100 μm). K požadované změně viskozity během dávkovacího procesu dochází na základě aplikace přídavné energie pomocí UZD do oblasti transportní kapiláry (kapitola 3.3)

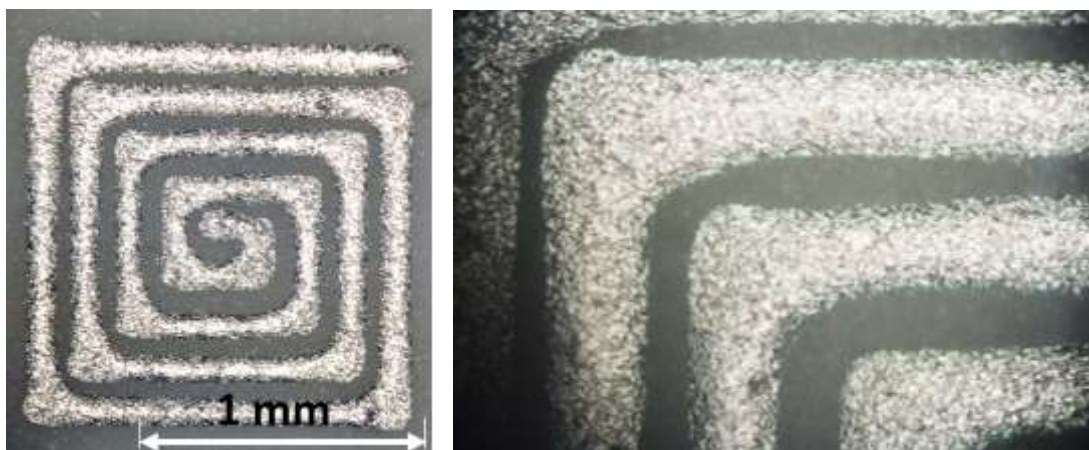


Obr. 3.39 Změna viskozity mezni vrstvy pasty v závislosti na přídavné UZ energii

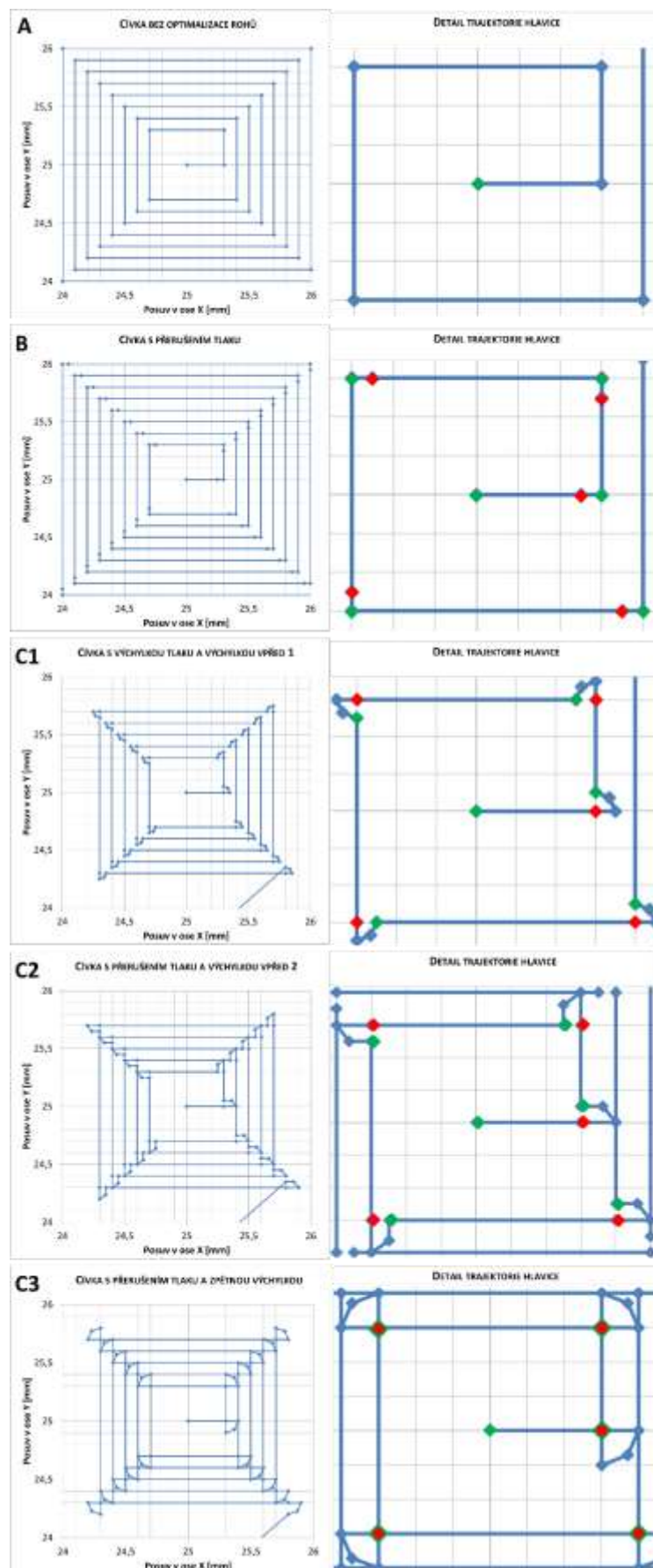
3.11.3 Subrutiny pro optimalizaci tisku rohů motivu

Vzhledem k omezením vyplývajícím z komerčně užívaných dispensních systémů je nutné přistupovat k softwarovým korekcím, které řeší problémy s tiskem rohů. Cíle těchto korekcí je zajistit co nejvyšší shodu trajektorie a geometrických rozměrů tisknutého motivu a reálného tisku. Na obr. 3.41 je uveden postup optimalizačních vzorů pro různé metody provedení maximální shody s navrženým motivem. Na obrázku je celkem pět variant provedení. **Varianta A** zastupuje trajektorii tisku, která je shodná s návrhem motivu. Tato varianta je vhodná zejména pro motivy s velkým množstvím pasty a rozlišením nad 250 μm . **Varianta B** díky krátkému přerušení tlaku umožňuje redukci množství pasty v rohu, kde při nepřetržitém toku pasty docházelo k jeho hromadění. **Varianty C** jsou založeny na speciálním pohybu za účelem omezení předčasného slnutí rohové oblasti. V průběhu rohové procedury je kontrolován také tlak systému a ovládán dle požadavků. Jednotlivé varianty **C1**, **C2** a **C3** se odlišují tvarem trajektorie rohové procedury a její velikostí. Tyto metody tisku rohů jsou vhodné pro tisk s vysokým rozlišením, avšak vždy je nutné provést optimalizaci. Vzory uvedené na obr. 3.41 nejsou určeny jako zdrojové texty, ale uvádí možné nastavení trajektorie pohybu tiskové hlavičky.

Tyto pohybové algoritmy souvisejí s problémem uvedeným v kapitole 3.5.1, kde je popsán vztah mezi vztyčnou plochou dávkovaného média a povrchem substrátu. V souvislosti s vysokým rozlišením narůstá vliv změny adheze, kdy snížení adheze menší vztyčné plochy je nutné kompenzovat snížením adheze na výstupu z transportní kapiláry pomocí principu UZD (kapitola 3.3).



Obr. 3.40 Provedení rohů bez optimalizace trajektorie (varianta A)



Obr. 3.41 Optimalizace tisku rohů (zelený bod – aktivace dispense, červený bod deaktivace dispense)

3.12 Realizovaná ultrazvuková dispensní hlavice

Nová metoda optimalizace reologických vlastností dávkovaného média využívá speciální hlavici (UZD) vyvinutou v rámci dizertační práce. Hlavice byla vyvinuta v rámci několika vývojových stupňů.

3.12.1 Jednotlivé vývojové stupně ultrazvukové dispensní hlavice



Obr. 3.42 Jednotlivá provedení UZD1, UZD2, UZD3

Tabulka 5 Srovnání jednotlivých provedení UZD

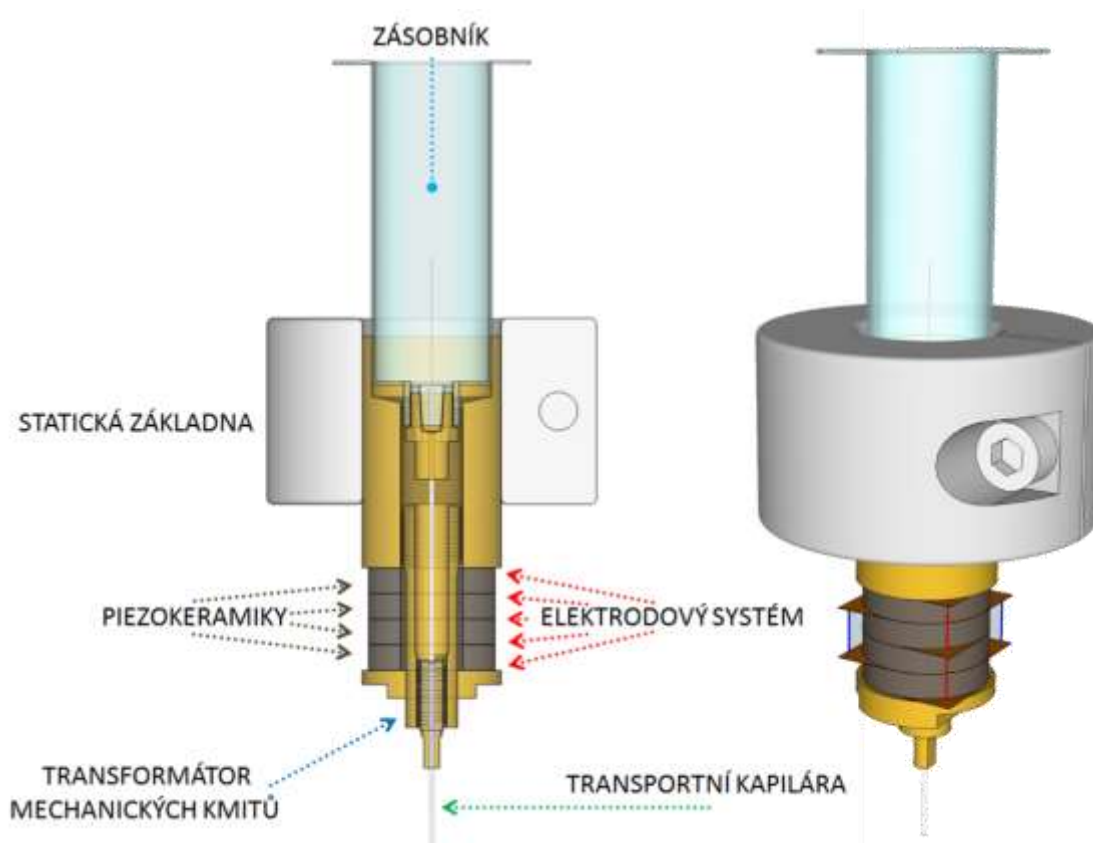
UZD1	+ Efektivita přenosu kmitů (Cu membrána / pájený spoj)
	+ Velmi malé rozměry
	- Improvizované provedení zásobníku
	- Problematická konstrukce (reprodukovatelnost)
UZD2	- Verze bez mechanických prvků pro přizpůsobení
	+ Univerzálnost řešení (kartuše, kapilára)
	+ Malé rozměry
	+ Snadná aplikace na polohovacím robotu
UZD3	- Vysoký útlum mechanických kmitů (plastová příruba kapiláry)
	- Průměr kapiláry je omezen (komerčně dostupné až nad 100 μm)
	+ Použití standardní kartuše
	+ Efektivita přenosu kmitů (kovové díly + 2 epoxidové spoje)
	+ Dosažitelné rozlišení, lepší než 60 μm
	- Speciální konstrukce / díly
	- Větší rozměr
	- Vyšší hmotnost (292 g)

Tabulka 5 uvádí srovnání jednotlivých vývojových stupňů UZD, přičemž jsou barevně rozlišeny jejich zásadní klady a zápory. V průběhu stavby jednotlivých vývojových stupňů UZD byla nejdříve ověřována doslova základní funkčnost sestavy, následně efektivita uspořádání jednotlivých dílů a jejich materiálové provedení. Po ověření vlivu pomocí funkčního vzorku UZD1 byl vyvinut univerzální UZD2 s možností využití standardních dílů tlakových dávkovacích systémů.

Systém UZD3 sloučil potřebnou efektivitu přenosu kmitů závislou zejména na použitých materiálech. Pro jednoduchost použití s běžnými dispensery je zachováno použití běžných kartuší. Za těchto podmínek je UZD3 schopna dosáhnout výsledků s rozlišením lepším než 60 μm při využití standardních TLV past (velikost částic do 5 μm , viskozita 200 Pa.s)

3.12.2 Konstrukční uspořádání výsledného vývojového stupně

Vývojový stupeň UZD3 byl použit pro tisk struktur na keramické substráty Al_2O_3 . Vzhledem k vysokému rozlišení a schopnostem tisku velmi malých objemových množství je nutné využít výškovou korekční jednotku (osa Z – kapitola 3.10.3). Zároveň jsou pro toto rozlišení nutné tiskové subrutiny zajišťující maximální dosažitelnou shodu natištěného motivu a samotného návrhu.



Obr. 3.43 Konstrukce modelu UZD3

Konstrukce UZD3 obsahuje duralový blok pro montáž k rameni polohovacího robotu (kapitola 3.2.1). Hmotnost UZD3 (290 g) je v aplikačním rozsahu pro polohování v kombinaci s robotem Fisnar F4200N. V kapitole 3.8 je popsána konstrukce komponent, které tvoří mechanické uspořádání pro ukotvení piezokeramických rezonátorů. Celá mechanická konstrukce tvoří svým uspořádáním rezonanční systém transformující mechanické kmity do těla transportní kapiláry.

3.12.3 Rozpracovaný vývojový stupeň

V průběhu provozních zkoušek UZD3 bylo testováno několik funkčních doplňků umožňujících dosažení stabilních výsledků. Pro další redukcí šířky čáry je zapotřebí uvažovat o optimalizaci systému jako celku. Ke zmenšení dávkovaného objemu může v této fázi (šířka čáry pod $60\text{ }\mu\text{m}$) dojít při splnění určitých podmínek. Jedná se zejména o *průměr kapiláry*, *odstup kapilára – substrát*, ale v první řadě jde o materiál, který musí obsahovat menší částice než pasty použité v této práci s velikostí částic do $5\text{ }\mu\text{m}$.

Optimalizace systému je založena v zásadě na těchto parametrech, které jsou závislé na *reologických* vlastnostech dávkovaného média a *velikosti částic*.

Funkční doplňky

a) Ultrazvukový oplach kapiláry

Jedná se o UZ lázeň s kapalinou, která mechanické kmity přenáší na kapiláru a ta pomocí řízeného pneumatického procesu vyčistí transportní kapiláru od zbylé pasty. Tento čistící proces bude automaticky zařazen na konec tiskového procesu s následným zajištěním kapiláry proti jejímu vysychání.

b) Vývoj korekční jednotky pro osu Z

Plánovaná korekční jednotka pro osu Z je založena na tlakovém principu, což umožňuje za použití dostupných tlakových senzorů vyhodnotit výšku kapiláry nad substrátem s přesností na jednotky μm . Tento problém je však spojen s velmi přesnou mechanickou konstrukcí kapiláry, která je vytvořena jako souosá konstrukce transportní kapiláry dávkovaného média a kapiláry pro tlakové médium.

Současně je možné použít optické vyhodnocení vzdálenosti na triangulačním principu, které je ale oproti pneumatickému systému náročnější z hlediska vyhodnocení.

c) Tlaková dispensní jednotka

Použitá digitální jednotka dispenseru umožňuje pouze spínání tlakové větve, která má konkrétní analogově nastavenou hodnotu tlaku. Pro UZD3 by znamenala digitální jednotka umožňující softwarové ovládání hodnoty tlaku v průběhu procesu navýšení funkčnosti z hlediska přesnosti systému. Toto nastavení se týká tisku zakřivení čáry, tisku na členitý povrch apod.

d) Budicí systém

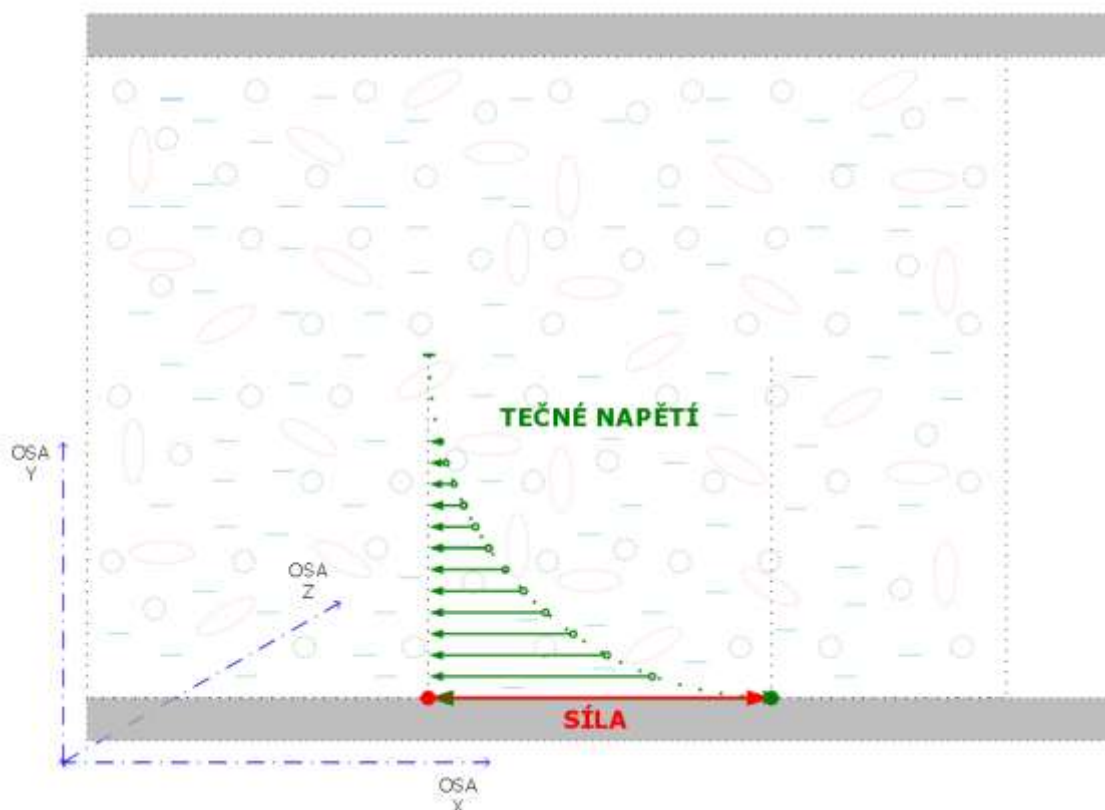
Výkon budicího systému je možné libovolně navyšovat, ale z hlediska velikosti UZD hlavičky je vhodné vytvořit optimální sestavu obsahující efektivní buzení s co nejmenším zatížením polohovacího mechanismu. Mechanická výchylka kapiláry je z pohledu přesnosti a kritických parametrů optimální maximálně do 2 μm , kdy dosahujeme přibližně 3% změny hodnoty odstupu kapiláry od substrátu.

Velikost částic - parametr dávkovaného média

Obr. 3.44 znázorňuje tok dávkovaného média transportní kapilárou, kdy dochází k ovlivnění tokových křivek v závislosti na dynamickém tření v oblasti mezní vrstvy (rozhraní stěna kapiláry – pasta). Tokové křivky jsou v mezní vrstvě zpomaleny a v souvislosti s reologickými vlastnostmi materiálu přenášejí část těchto brzdných účinků do středu kapiláry. Brzdnou sílu způsobenou třením v mezní vrstvě na obr. 3.44 vyznačuje *červená šipka* a tečná napětí v pastě touto silou vyvolaná jsou vyznačena zelenými šipkami. Obr. 3.44 uvádí příklad rozložení těchto napětí, která znamenají změnu toku napříč kapilárou a dle parametrů kapiláry a dávkovaného média se charakter vlivu na médium může lišit.

Velikost částic v souvislosti s vnitřním průměrem kapiláry představuje technologickou hranici, která je vztažena k poměru vnitřního průměru kapiláry a velikosti částic v pastě. Pokud je tento poměr menší než 5, nastává problém

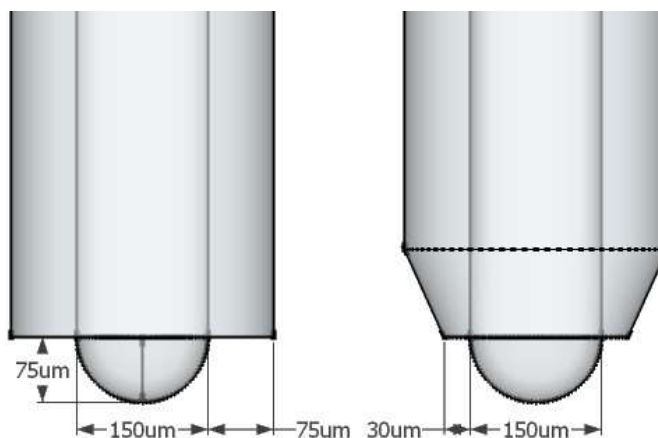
s charakterem toku dávkovaného média, kdy nanesená pasta tvoří nepravidelné tvary a tisk nemá homogenní vlastnosti.



Obr. 3.44 Tok dávkovaného materiálu transportní kapilárou

Vnitřní průměr transportní kapiláry – parametr dávkovacího systému

Transportní kapilára svým pohybem způsobuje, že dávkované médium při posuvu do strany ulpívá na stěně kapiláry a v případě široké stěny dochází k ovlivnění tisku nadměrným množstvím pasty v kontaktu s kapilárou. Z tohoto důvodu je při malých vnitřních průměrech kapilár se silnými stěnami těmto vyústěním věnovat pozornost a volit správný tvar. Z těchto důvodů byla také zvolena pro vnitřní průměr pod $50\text{ }\mu\text{m}$ kapilára pro wire-bonding s vnitřním průměrem $42\text{ }\mu\text{m}$.



Obr. 3.45 Vyústění transportní kapiláry



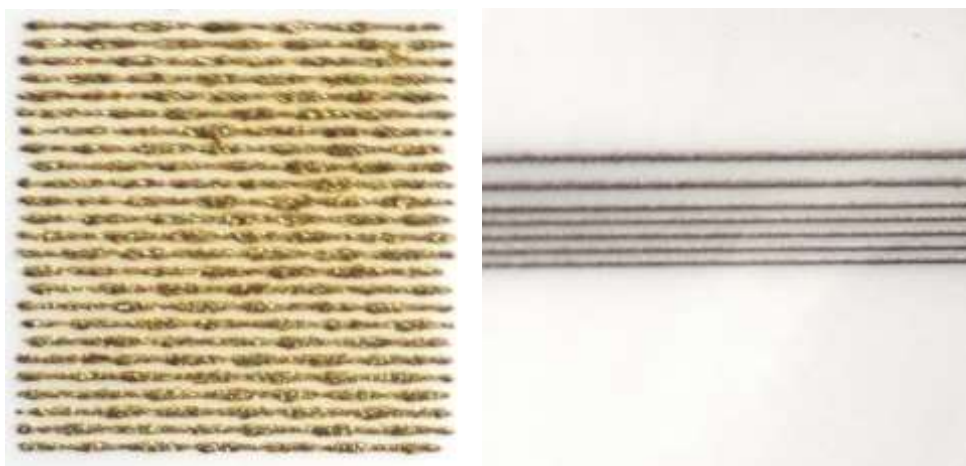
Obr. 3.46 Reálné provedení kapiláry s vnitřním průměrem 250 μm (vlevo) a 42 μm - kapilára wire-bonding (vpravo)

Vzdálenost kapilára – substrát / korekce osy Z – parametr dávkovacího systému

Tento parametr je nutné snižovat vzhledem ke snaze minimalizovat objemové množství nanášeného média. Vzhledem k aktuální hodnotě odstupu přibližně 50 μm při tisku s UZD3 a známou nerovností povrchu keramických substrátů (kapitola 3.10.1) je nezbytné používat alespoň softwarovou korekci tiskových dat pro osu Z, která zajistí stabilní podmínky pro tisk. Pro vzdálenosti menší než 25 μm je nezbytné již využívat automatizovanou optickou nebo pneumatickou jednotku výškové korekce UZD hlavičky (kapitola 3.10.3).

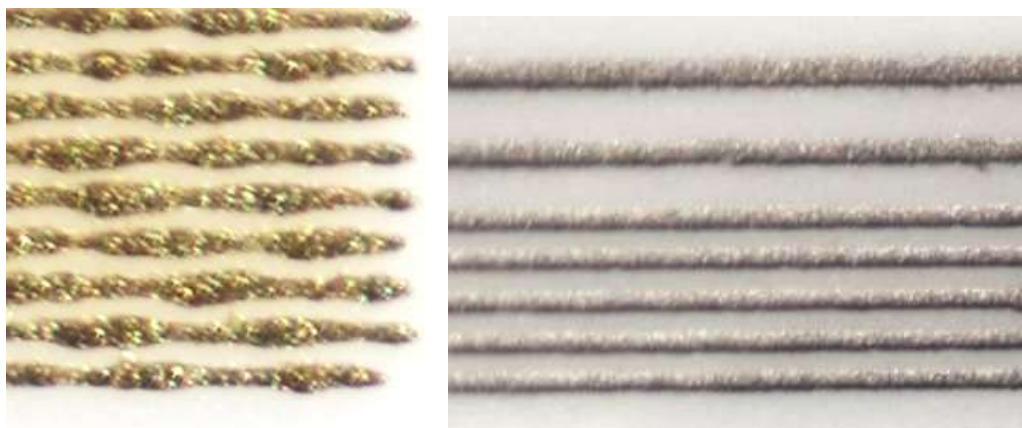
3.13 Srovnání standardních systémů se systémem UZD

Následující obrázek nabízí srovnání výsledku tisku pomocí UZD 3 a výsledku tisku pomocí síťotiskové technologie s vysokým rozlišením (75 μm). Tyto síťotiskové výsledky jsou v současné době světovými výrobci prezentovány jako maximální dosažitelné rozlišení. [22], [23]



Obr. 3.47 Nafocené vzorky: vlevo síťotisk Heraeus C5810 L03-02, rozlišení 75 μm , vpravo nová metoda UZD3 65 - 75 μm

Obr. 3.47 uvádí názorné srovnání výsledku. Detaily tištěného motivu jsou zobrazeny na následujícím obrázku, kde je patrný vliv síťoviny při tisku s rozlišením pod 150 μm . Výsledek UZD3 není mezní hranice rozlišení dispensního tisku. Tisk s vyšším rozlišením pod 75 μm však již vyžaduje optimalizaci dle kapitoly 3.12.3.



Obr. 3.48 Detaily tisku

Z hlediska objemu nanášeného média je ve srovnání s komerčně dostupnými systémy tento systém schopen nanést objemové množství 1 nl standardních TLV materiálů o viskozitě 200 Pa.s. Takto viskózní materiály není možné nanášet metodou *Jet dispensing*, která potřebuje materiály vhodné pro tryskání (s nižší viskozitou). Z pohledu na požadavky realizovaných struktur je také výhodou schopnost nanášení TLV past ve standardních tloušťkách cca 30 – 45 μm , kdy po výpalu vznikne vrstva dosahující tloušťky přibližně 10 μm . Z tohoto pohledu je vhodná kombinace sítotisku a dispense s ultrazvukovou podporou, což nám umožňuje kombinovat tyto metody při výrobě HIO.

3.14 Vyhodnocení vlivu UZD systému na tisk tixotropních materiálů

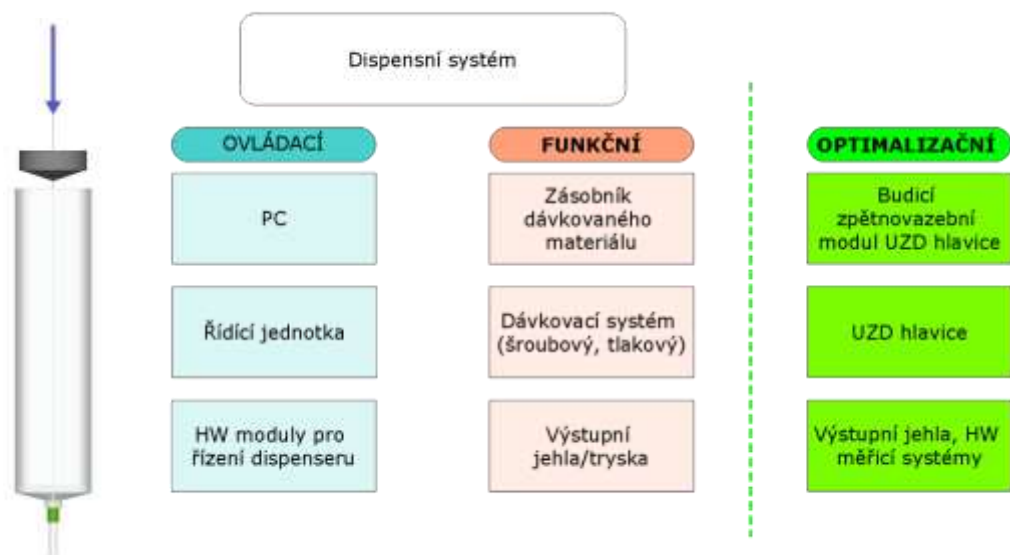
UZD systém realizovaný v rámci této práce **prokázal vliv** na dávkovaný materiál, přičemž poslední vývojový stupeň UZD3 dosahuje tiskového rozlišení pod 75 μm . Doposud v rámci řešené problematiky je dosahováno rozlišení 150 μm , přičemž vyššího rozlišení se dosahuje nepřímo leptáním, případně vypalováním požadované struktury laserem.

Vliv UZD jednotky na dávkovaný materiál lze vysvětlit následovně. Transportní kapilára s vnitřním průměrem pod 100 μm klade uvedeným materiálům (velikost částic 5 μm , viskozita 200 Pa.s) velký **hydraulický odpor**. Ten je možné redukovat, a právě takový vliv nabízí UZD jednotka změnou viskozity v mezní vrstvě **kapilára – pasta**. Tím zvyšuje **míru propustnosti** kapilár s malými vnitřními průměry. Zároveň je nutné řešit vzhledem ke změně reologických parametrů dávkovaného média rostoucí vliv ostatních parametrů tiskového procesu, které souvisejí také s vyšším rozlišením. Jedná se zejména o odstup kapiláry od substrátu, kde se pohybujeme již na rozmezí 30 – 50 μm . Nezanedbatelné je také řešení trajektorie tiskové hlavičky (kapitola 3.11.3). Speciální polohovací algoritmy pro jednotlivé části tištěného motivu zajišťují kompenzaci vlivů vyplývajících z adhezní podmínky uvedené v kapitole 3.5.1.

3.15 Výsledky dosažené optimalizací dispensního tisku

Dispensní systém představuje soustavu, která dokáže definovaně dávkovat požadovaný materiál. Hlavním důvodem optimalizace dispensního systému bylo navýšení rozlišení a přesnosti tištěného motivu metodou dispense.

3.15.1 Rekapitulace řešených problémů



Obr. 3.49 Dispensní systém – diagram

Na obr. 3.49 jsou uvedeny oddíly dispensního procesu. Část *ovládací* obsahuje řídicí jednotku, obslužný software a hardwarové moduly zprostředkovávající jednotlivé funkce (hydraulický okruh, rozvod vzduchu, vakua apod.). Tyto prvky zajišťují řízení jednotlivých funkčních prvků v definovaných intervalech hodnot a parametrů.

Funkční část reprezentuje samotné funkční prvky. Zásobník dávkovaného materiálu, jeho temperaturu, tlakové požadavky, materiál pláště a vyústění. Dávkovací princip a výstupní ústrojí jsou voleny na základě požadavků dávkovaných materiálů a technologických parametrů procesu. Funkční prvky charakterizují dispensní systém a kategorizují ho pro použití s určitými materiály a aplikacemi. Spojením částí *ovládací* a *funkční* vzniká celek, který je obecně považován za dispensní systém umožňující nanášení příslušných materiálů v dané aplikační oblasti.

Optimalizační část je navržena pro kombinaci s částí *funkční* v případě požadavku na hodnoty parametrů, které není možné pomocí funkčních prvků dosáhnout. Optimalizační část v tomto případě aplikací nové metody (kapitola 3.3) přistupuje k řešení problému navýšením funkčnosti o přídavnou ultrazvukovou energii. UZD hlavice tedy zajišťuje dosažení parametrů dispenseru, *kterých využitím standardních funkčních prvků nebylo možné dosáhnout*.

Charakteristické vlastnosti pasty, minimální vytlačený objem, spojitost čáry a přesnost motivu. Základní požadavky na dispensní systém v elektrotechnických výrobcích. Principiální uspořádání uvedená v kapitolách 3.3, 3.4, 3.12 vedou k požadované optimalizaci tokových křivek na výstupu dispenseru a tím umožňují řešit optimalizaci dispensního systému.

Z důvodu optimalizace dispensního systému bylo přistoupeno k problematice již na úrovni reologických vlastností nanášeného materiálu a jejich ovlivňování. Za tímto účelem jsem zvolil metodu ultrazvukového přenosu energie, která cíleně ovlivňuje reologické vlastnosti. Vzhledem k charakteru ultrazvukových kmitů a jejich působení je vliv ultrazvuku na reologické vlastnosti pasty časově velmi přesně dávkovatelný. Lokální účinky v mezní vrstvě *kapilára – dávkovaný materiál* jsou vyvolány pouze ve vztyčné ploše na rozhraní a v čase působení ultrazvukových kmitů. Tím je přesně definován časový interval působení mechanických kmitů.

3.15.2 Ukázky tiskových výsledků UZD3

Obr. 3.50 dokumentuje tisk s kapilárou o vnitřním průměru 42 μm a tiskovým rozlišením 75 μm . Tyto výsledky zároveň dokumentují pravidelnost šířky čáry, která je ve srovnání se sítotiskem značnou výhodou (obr. 3.47).



Obr. 3.50 Tisk čar s mezerami 200/100/75 μm , rychlost 1,5 mm/s, šířka čáry 75 μm , minimální mezera 25 μm .

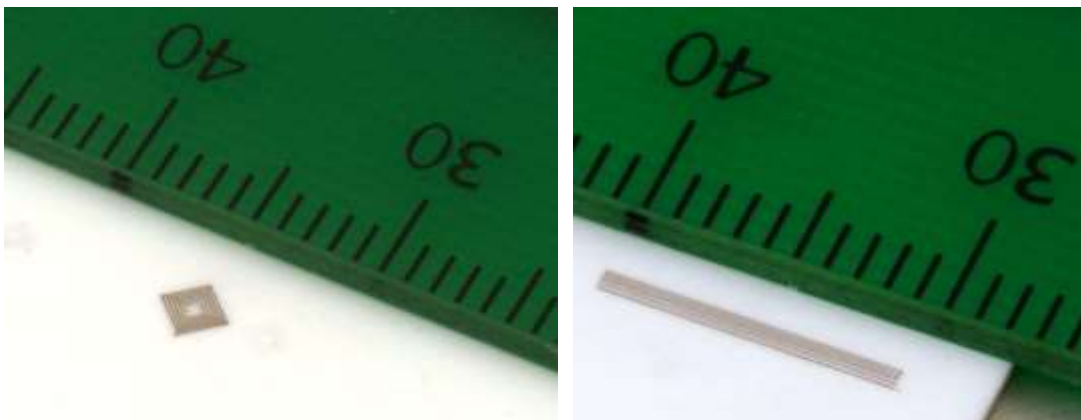
Obr. 3.51 zobrazuje příklad tisku cívky, kde vložený drát reprezentuje tloušťku 100 μm . Zde jsou patrné zvýšené nároky na návrh trajektorie tiskové hlavičky. Rohy jsou tištěny s využitím tiskových algoritmů, jejichž příklady jsou uvedené v kapitole 3.11.3.



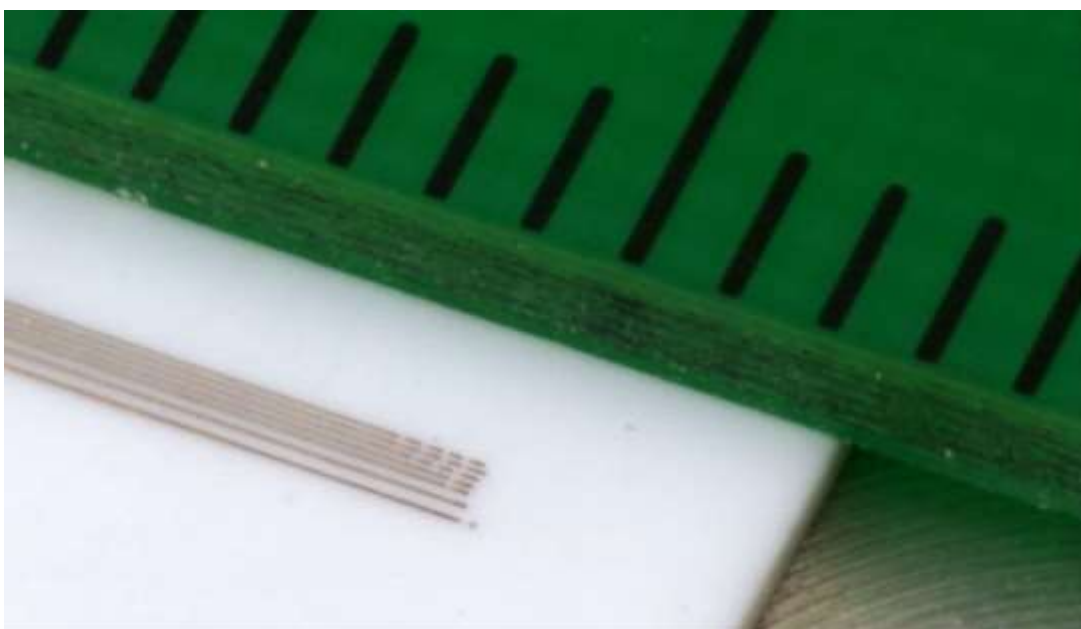
Obr. 3.51 Tisk cívek, (vpravo šířka čáry 125 μm , rozteč středů čar 350 μm)

Pro názornou ukázkou obr. 3.52 uvádí srovnání tištěného motivu pomocí UZD3 s milimetrovým měřítkem. První případ je cívka a druhý případ jsou čáry s rozlišením

75 μm , které obsahují startovací sekvenci v podobě přerušovaného tisku, který přechází po sepnutí UZD jednotky v tisk bez přerušování.



Obr. 3.52 Testovací motivy



Obr. 3.53 Detail startovací sekvence

3.16 Shrnutí výsledků doktorské práce

Doktorská práce dosáhla v plné míře splnění zadaného cíle „*Optimalizace nanášení tixotropních materiálů s využitím ultrazvukové energie*“.

Výsledné parametry tisku dokumentují úspěch dané metody v předepsaných aplikacích v tlustovrstvové technologii. Zde tato nová metoda umožňuje dosažení rozlišení **při tisku TLV past 75 μm** , rychlostí přibližně 1,2 mm/s. Oproti tomu sítotiskové metody dosahují podobné kvality tisku **až při rozlišení 250 μm** a více. Metody umožňující toto vysoké rozlišení, například *jet dispensing*, naopak neumožňují dosažení ostatních parametrů tisku (tloušťka a rovnoměrnost).

Dílčího cíle „*Výzkum vlivu ultrazvukového působení na chování tixotropních materiálů*“ bylo dosaženo postupným modelováním, simulací i praktickými výsledky. Tyto části práce jsou uvedeny v kapitolách 3.2, 3.3, 3.4, 3.5.

Cíl „*Návrh a konstrukce dispensní hlavice s ultrazvukovou optimalizací*“ byl splněn v přímé návaznosti na výzkum UZ principu optimalizace. Kapitoly 3.6, 3.7 a 3.8 popisují realizaci jednotlivých vývojových stupňů UZD jednotek.

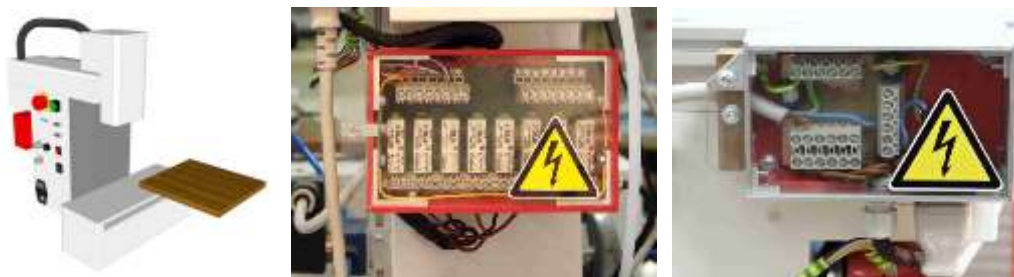
Cíl „*Aplikace ultrazvukového principu pro soustředění přídatné energie v místě dávkovací kapiláry*“ je realizován prostřednictvím UZD jednotek vlastní výroby. Ultrazvuková optimalizace je popsána v kapitolách 3.9, 3.11 a 3.13. Tyto kapitoly popisují vliv UZ podpory a nabízejí srovnání výsledků tisku se sítotiskovým výstupem, kde je patrné dosažení kvalitnějšího výstupu tištěného pomocí UZD3 (obr. 3.47)

„*Optimalizace tokové křivky nanášeného materiálu uvnitř dispensní jehly*“ je další dílčí cíl práce, který prakticky popisuje chování tixotropního materiálu v transportní kapiláře dispensního procesu. Materiál je přídatnou energií ovlivněn z hlediska rozložení tokových křivek, což je blíže popsáno v kapitolách 3.2, 3.3.

Cíl „*Simulace parametrického modelu proudění média kapilárou*“ byl ve spolupráci s Ing. Psotou proveden pro tři hodnoty vnitřních průměrů transportních kapilár. Rozložení tokových křivek (kapitola 3.4.4) vykresluje nehomogenní charakter proudění uvnitř kapiláry, který přímo indikuje místo, kde dochází k ovlivnění rychlosti toku pasty / viskozity na základě jejího tixotropního charakteru.

Tato kapitola uvádí přehled hlavních fází vývoje ultrazvukové dispensní metody.

Vytvoření pracoviště pro dispensní tisk



Obr. 3.54 Úpravy dispensního robotu Fisnar F4200N (kapitola 3.2)

Parametry zařízení pro dispensi:

- **Spínací skříň** obsahuje 8 releových spínaných větví připojených na vstupně výstupní rozhraní dispensního robota
- **Rozváděčová skříň** slouží pro napájení spínaných větví napětím 230 V~



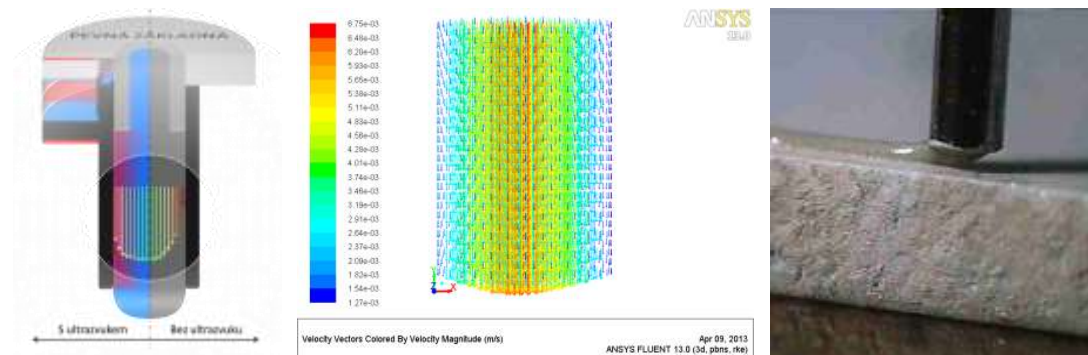
Obr. 3.55 Jednotlivé provedení fixačních stolků (kapitola 3.2)

Parametry fixačních stolků:

Tabulka 6 Parametry vyrobených fixačních stolků

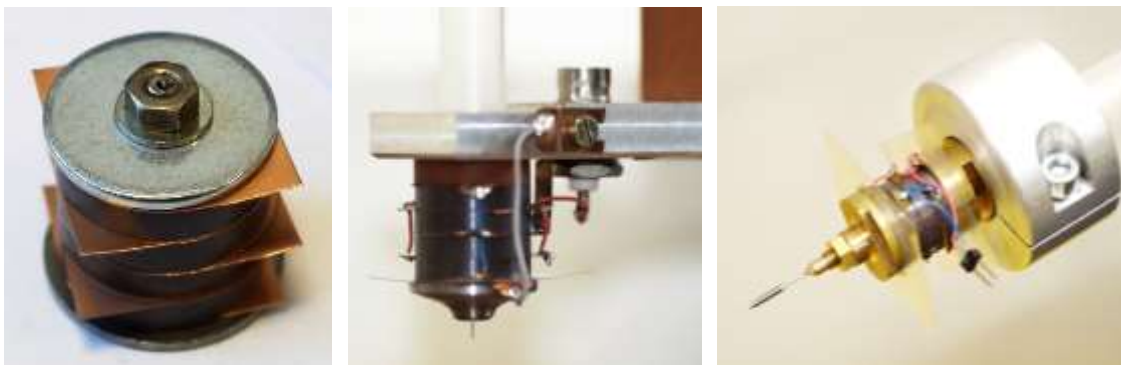
	Kartitový fixační stůl	Duralový fixační stůl
Maximální velikost substrátu	10 x 10 mm	5 x 5 mm
Způsob fixace	Vakuová	Vakuová
Dorazy	Statické ocelové	Excentrické ocelové
Rovinnost	20 μm / 1 cm	2 μm / 1 cm

Návrh nové metody, testování, simulace



Obr. 3.56 Návrh provedení UZD jednotky, simulace, tisk (kapitoly 3.3, 3.4, 3.5)

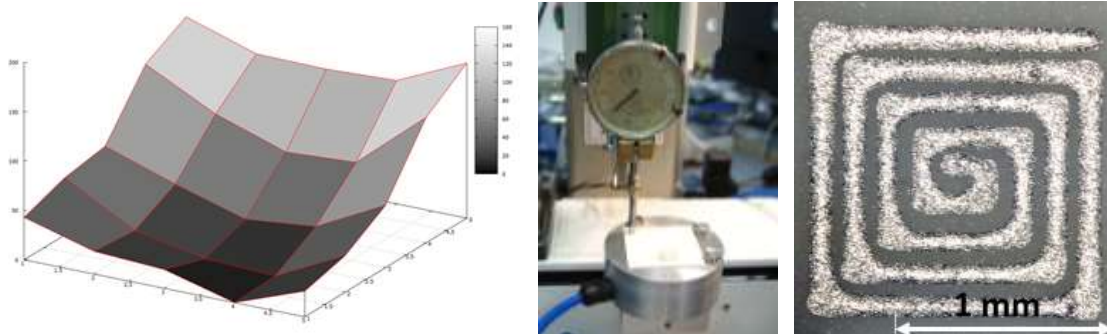
Návrh nové metody pro ultrazvukovou optimalizaci vycházel z prvotní myšlenky během práce s TLV materiálem, následoval návrh funkčního modelu se základní simulací proudění v kapiláře. Dále byly prostudovány zdroje mechanických kmitů (piezokeramické materiály), které byly zvoleny jako funkční prvky pro stavbu UZD. Vyrobil jsem UZD jednotky, které jsem postupně optimalizoval za účelem získání co nejvyšší efektivity a optimálního konstrukčního uspořádání.



Obr. 3.57 Provedení UZD1, UZD2, UZD3 (kapitoly 3.6, 3.7, 3.8, 3.12)

Tyto vývojové stupně byly optimalizovány na základě vlastních myšlenek, které vycházely z požadavků na danou technologii. Zejména se jednalo o zvýšení rozlišení běžných metod (hraniční 150 μm) společně s dosažením opakovatelnosti. Vývojový stupeň UZD3 splnil požadavky na tuto technologii.

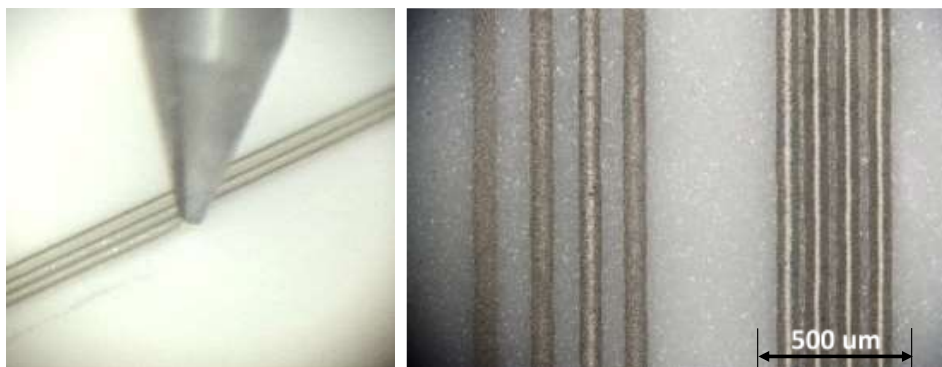
Měření, funkční doplňky



Obr. 3.58 Korekční jednotka osy Z, subrutiny pro tisk rohů (kapitoly 3.10, 3.11)

V průběhu vývoje a následného testování technologie i dílčích konstrukčních uspořádání byly zjišťovány nové technologické hranice, kterými je třeba se dále zabývat pro možnosti dosažení rozlišení pod 50 μm . Za tímto účelem bylo provedeno několik testování, návrhů a měření v oblasti rovinnosti substrátu, korekce pohybu v ose Z, čistící proces kapiláry, řízení tlaku i optimalizační algoritmy pro tisk rohů.

Výsledné tisky



Obr. 3.59 Ukázka tisku s rozlišením 75 μm

Je zřejmé, že z provedených měření plyne:

Výsledné parametry tisku dokumentují splnění cíle doktorské práce vytvořením nové metody v předepsaných aplikacích v tlustovrstvové technologii. Zde tato nová metoda umožňuje dosažení rozlišení při tisku TLV past 75 μm , rychlostí přibližně 1,2 mm/s. Parametry tiskových výstupů metody využívající ultrazvukovou optimalizaci toku média transportní kapilárou jsou co do kombinace parametrů komerčními metodami nedosažitelné. Jedná se o *tiskové rozlišení, tloušťku nanášené vrstvy, použití standardních materiálů z oblasti TLV past a míru shody tištěného motivu s návrhem*.

3.17 Patentování nové metody UZD dispense

Číslo přihlášky: 2010-858

Číslo dokumentu: 303451

Datum přihlášení: 24.11.2010

Název: Nanášecí ústrojí dispenzního přístroje pro selektivní nanášení viskózních materiálů

(EN: Dispersion device application mechanism for selective application of viscous materials)

Přihlašovatel/Maji tel: Vysoké učení technické v Brně, Brno, CZ

Původce: Szendiuch Ivan Doc. Ing. CSc., Brno, CZ
Buršík Martin Ing., Zlín, CZ
Jankovský Jaroslav Ing., Brno, CZ
Řezníček Michal Ing., Nadechlebice, CZ

4. - poplatek zaplacen

MPT: B 05 C 5/00

Datum zveřejnění: 19.09.2012

Datum udělení patentu: 08.08.2012

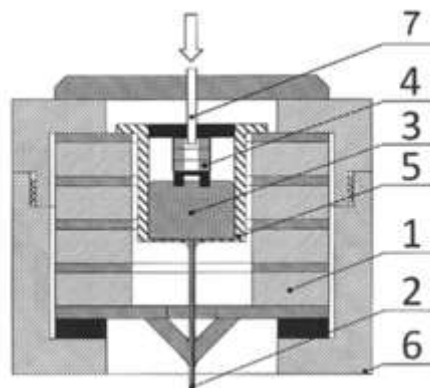
Datum publikace patentu: 19.09.2012

Stav: Platný dokument

Druh: PV národní s žádostí o udělení patentu

Anotace (CZ): Nanášecí ústrojí (6) dispenzního přístroje pro selektivní nanášení viskózních materiálů na organické i anorganické substráty v elektronice a strojní výrobě, které je opatřeno nejméně jedním zdrojem ultrazvuku (1, 4), kde zdroj ultrazvuku (1) je spojený s nanášecí kapilárou (2) a přídavný zdroj ultrazvuku (4) je umístěn na nádobce (5) s nanášeným materiálem (3).

Anotace (EN): The present invention relates to a dispersion device application mechanism (6) for selective application of viscous materials to both organic and inorganic substrates in electronics and mechanical production, wherein the device is provided with at least one ultrasound source (1, 4) wherein the ultrasound source (1) is connected with an application capillary (2) and the additional ultrasound source (4) is located on a tank (5) containing material (3) to be applied.



V průběhu vývoje nové metody byla podána patentová přihláška nové metody nanášení využívající ultrazvuku (24.11.2010). Patent byl udělen 08.08.2012. Jednalo se o udělení českého patentu. [28]

4 Závěr

Cíl práce:

Optimalizace nanášení tixotropních materiálů s využitím ultrazvukové energie.

Disertační práce řeší *optimalizaci nanášení tixotropních materiálů s využitím ultrazvukové energie*. V rámci práce byla nastudována problematika jak z literárních zdrojů (uvedeny vždy na konci daných kapitol), tak z účasti na konferencích. S využitím těchto zkušeností z oblasti tlustovrstvových technologií byla navržena nová metoda pro aplikaci přídavné UZ energie do objemu média dávkovaného pomocí dispensního pneumatického systému (kapitola 3.3). Vývoj technologického provedení tiskové hlavice s ultrazvukovou podporou lze rozdělit do jednotlivých kroků, které vytvořily podmínky pro výzkum jednotlivých vlivů působících v dispensním procesu.

V první fázi jsem *vytvořil pracoviště* pro dispensní tisk. Toto jsem dále přizpůsobil pro ovládání funkčních bloků doplňujících standardní funkce dispensního robota. Dispensní robot tak byl vybaven příslušenstvím umožňujícím tisk s vysokým rozlišením, zejména fixačním stolcem a spínací elektronikou pro automatizaci procesu. (kapitola 3.2).

Současně probíhal *návrh nové metody* pro aplikaci UZ energie. Ta je v procesu aplikována jako optimalizační funkce. Výsledkem návrhu této metody bylo *konstrukční uspořádání* rezonančního systému s popisem jeho vlivu na reologické vlastnosti pasty. Na tomto pracovišti jsem provedl první testy chování tlustovrstvových materiálů v dispensním procesu, které pomohly charakterizovat materiály a stanovit oblasti vhodné pro *optimalizaci procesu*. Výzkum a ověření vlivu UZ působení na chování tixotropních materiálů byl realizován na základě testů s prvotními funkčními vzorky UZD hlavice, které vykazovaly schopnosti přenosu mechanických kmitů a také vliv těchto kmitů na reologické vlastnosti pasty. Ověření chování pasty uvnitř transportní kapiláry bylo také ověřeno simulací proudění viskózních látek v programu *Ansys Fluent* (kapitoly 3.3, 3.4, 3.5).

Realizační fáze popisuje tři vývojové stupně UZD (kapitoly 3.6, 3.7, 3.8), přičemž třetí vývojový stupeň je schopen tisknout testovací vzorky tisku s dosaženým *rozlišením pod 100 μm*. Ultrazvuková dispensní hlavice UZD3 je přizpůsobena pro použití s komerčním polohovacím robotem, a je možné s ní provádět tisk standardním dispensním systémem.

Optimalizační rutiny jednotlivých součástí pro tiskový proces byly zpracovány pro konkrétní součásti. Základní parametry, jež bylo nutné optimalizovat, jsou uvedeny v kapitolách 3.10 a 3.11. Tyto kapitoly se věnují navrženým postupům optimalizace.

Shrnutí parametrických vlastností výsledného vývojového stupně UZD3 jsou uvedeny v kapitole 3.12, která shrnuje jednotlivé *vývojové stupně* a srovnává jejich vlastnosti. Kapitola se věnuje také doporučení dalšího vývoje. Jednotlivé funkční doplňky jsou schopny posunout možnosti této metody na rozlišení pod 50 μm, kdy je však nutné respektovat nutnost kombinace speciálních vlastností systému (kapitola 3.12.3).

Poslední část práce se věnuje *hodnocení* tiskových výstupů, *shrnutí* postupu vývoje metody ultrazvukové optimalizace tisku a jejímu srovnání se standardními procesy.

Práce splnila stanovené cíle dosažením rozlišení pod 100 μm. Navržená a vyrobená UZD hlavice umožňuje tisknout motiv s čarami s *rozlišením 75 μm*. Zařízení

je konstruováno pro nanášení standardních tixotropních materiálů, umožňující změnu reologických vlastností v průběhu dávkovacího procesu. Tyto materiály jsou běžně užívány v tlustovrstvové technologii, pro kterou je nově vyvinutá metoda určena.

Metoda je navržena pro použití na stávajících dispensních systémech bez nutnosti úprav. Jednoduchá aplikovatelnost této metody je zajištěna komplexním řešením UZD hlavice vzhledem k dávkovanému médiu a lokálnímu působení ultrazvuku až v samotném vyústění transportní kapiláry.

Parametry tiskových výstupů nové metody využívající ultrazvukovou optimalizaci toku média transportní kapilárou jsou co do kombinace parametrů komerčními metodami nedosažitelné. Jedná se o *tiskové rozlišení, tloušťku nanášené vrstvy, použití standardních materiálů z oblasti TLV past a míru shody tištěného motivu s návrhem*.

Výsledky dosažené během řešení jednotlivých cílů této práce jsem kontinuálně publikoval mimo jiné na následujících mezinárodně uznávaných konferencích: 42nd International Symposium on Microelectronics IMAPS 2009 [13], 18th European Microelectronics and Packaging Conference EMPC 2011 [24], 4th Electronic System-Integration Technology Conference ESTC 2012 [26], 36th International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE 2013, 19th European Microelectronics and Packaging Conference EMPC 2013 [27].

Práce byla podporována v rámci interních grantů Ústavu mikroelektroniky VUT v Brně:

FEKT-S-11-5/962 Výzkum excelentních technologií pro 3D pouzdření a propojování elektronických čipů a obvodů

FEKT-S-14-2168 Výzkum moderních a inovačních technologií pro propojování a pouzdření v mikroelektronice

Pro tuto novou metodu optimalizace dispensního tisku byla 24.11.2010 podána patentová přihláška s názvem **Nanásecí ústrojí dispensního přístroje pro selektivní nanášení viskózních materiálů. [28]** Tento patent byl **udělen 08.08.2012**.

Vlastní autorský podíl na uvedených publikacích se pohybuje na úrovni 60%. Při jejich tvorbě jsem problémy diskutoval s kolegy, kteří jsou v publikacích uvedeni jako spoluautoři.

5 Literatura

- [1] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Vyd. 1. Brno: VUTUM, 2006, 379 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [2] HILL, McGraw. *Handbook of Thick Film Hybrid Microelectronic; A Practical Sourcebook for Designers, Fabricators*. Vyd. 1. Brno: VUTUM, 2006, 379 s. ISBN 978-0070266803.
- [3] PITT, By Malcolm Haskard. *Thick-film technology and applications*. Vyd. 1. Port Erin, Isle of Man, UK: Electrochemical Publ, 1997, 379 s. ISBN 09-011-5035-5.
- [4] PITT, Ed. by Keith. *Handbook of thick film technology*. 2. ed. Port Erin, Isle of Man, UK: Electrochemical Publ, 2005, 379 s. ISBN 09-011-5042-8.
- [5] HARMAN, George G a George G HARMAN. *Wire bonding in microelectronics*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, c2010, xx, 426 p. ISBN 978-007-1476-232.
- [6] Heraeus Group, 2013, (25.6.2013)
dostupné z WWW: http://heraeus-circuits-components.com/en/home/circuits_and_components.aspx
- [7] FELBA, Jan. *Inkjet printed electrically conductive structures for microelectronics*. In: *Proceedings of the 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. IEEE, 2011, s. 6-11. ISBN 978-1-4577-2111-3. DOI: 10.1109/ISSE.2011.6053540. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6053540>
- [8] LUO, Wenjian a Guiling DENG. *Simulation analysis of jetting dispenser based on two piezoelectric stacks*. In: *2013 14th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. IEEE, 2013, s. 738-741. ISBN 978-1-4799-0498-3. DOI: 10.1109/ICEPT.2013.6756571. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6756571>
- [9] SHAN, Xiuyang; CHEN, Yun; PENG, Xianan; LI, Hanxiong, "Modeling of laminar fluid flow in jet dispensing process. In: *2014" International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. IEEE, 2014, s. 276-279. ISBN 978-1-4799-4707-2, DOI: 10.1109/ICEPT.2014.6922653. Dostupné z: URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6922653&isnumber=6922536>
- [10] KISIC, Milica, Bojan DAKIC, Mirjana DAMNJANOVIC, Aleksandar MENICANIN, Nelu BLAZ a Ljiljana ZIVANOV. *Design and simulation of 13.56 MHz RFID tag in ink-jet printing technology*. In: *Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology*. IEEE, 2013, s. 263-267. ISBN 978-1-4799-0036-7. DOI: 10.1109/ISSE.2013.6648254. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6648254>
- [11] Viewegh dosing specialist, (14.5.2011) dostupné z WWW: <http://www.dosieren.de/>.
- [12] Al Lewis, Asymtek A Nordson Company, (9.3.2014)
Dostupné z WWW: <http://www.nordson.com/en-us/divisions/adhesive-dispensing/support/Literature/Pages/PublishedArticles.aspx>
- [13] BURŠÍK, M.; SZENDIUCH, I.; HLADÍK, J. *Deposition of Thick Film Fine Line Patterns by Direct Writing*. 42nd IMAPS 2009. San Jose, USA, IMAPS USA. 2009. p. 10 - 14.
- [14] ElectroScience Thick-Film Materials & Ceramic Tapes, 2012, (6.7.2013)
dostupné z WWW: <http://www.electroscience.com/products.html>
- [15] Epoxy Technology, Epoxy Adhesive Application guide, 2012, (6.7.2013)
dostupné z WWW: http://www.epotek.com/site/files/brochures/pdfs/adhesive_application_guide.pdf
- [16] YANG, E. H., *A Piezoelectric Microvalve for Micropropulsion*, (10.6.2014)
dostupné z WWW: http://www.noliac.com/Files/Billeder/Pdf/Pdf%20%20external/A_piezoelectric_microvalve_for_micropropulsion.pdf
- [17] Noliac piezo products, 2011, (12.10.2011) dostupné z WWW: <http://www.noliac.com/>
- [18] Noliac piezo products, 2011, (6.11.2011) dostupné z WWW: http://www.noliac.com/Files/Billeder/02%20Standard/Ceramics/Noliac_CERamics_NCE_datasheet.pdf

- [19] Jaroslav Janalík Vysoká Škola Báňská – Technická Univerzita Ostrava, Viskozita tekutin a její měření, 2010, (17.10.2014) dostupné z WWW: <http://www.338.vsb.cz/PDF/TEXTviskozitaPDF.pdf>
- [20] Jiří Erhart, Technická univerzita v Liberci, 2011, (17.10.2014) dostupné z WWW: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1112.pdf
- [21] Texas Instruments, OPA 445 datasheet (23.10.2014), dostupné z WWW: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa445.pdf>
- [22] LUNIAK, Marco, Klaus-Jurgen WOLTER, Mirjana DAMNJANOVIC, Aleksandar MENICANIN, Nelu BLAZ a Ljiljana ZIVANOV. Polymer thick film technology and its capability for medicine and sensor applications. In: *Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology*. IEEE, 2013, s. 70-73. ISBN 978-1-4799-0036-7. DOI: 10.1109/ISSE.2013.6648217. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6648217>
- [23] MARKOWSKI, Piotr. Ceramic material. In: *Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2005, s. 21. ISBN 0-387-23130-7. DOI: 10.1007/0-387-23314-8_2. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/0-387-23314-8_2
- [24] BURŠÍK, M.; SZENDIUCH, I.; JANKOVSKÝ, J. Dispensing process with additional ultrasonic energy. In *Proceedings of 18th European microelectronics packaging conference EMPC 2011*. Brighton, UK, IMAPS-Europe. 2011. p. 476 - 479. ISBN 978-0-9568086-0-8.
- [25] SZENDIUCH, I.; BURŠÍK, M.; JANKOVSKÝ, J. The dispensing system with the support of ultrasonic energy. In *Proceedings of 4th ESTC 2012*. 1. Amsterdam, Medicongress. 2012. p. 131 - 134. ISBN 978-1-4673-4644-3.
- [26] BURŠÍK, M.; JANKOVSKÝ, J.; ŘEZNÍČEK, M.; SZENDIUCH, I. New method for adjustment of elevation of the ceramic flatness for direct deposition. *Electronics Technology (ISSE)*, 2013 34th International Spring Seminar on Electronics. 2013. 2013(36). p. 6 - 7. ISSN 2161-2528.
- [27] BURŠÍK, M.; SZENDIUCH, I.; JANKOVSKÝ, J.; ŘEZNÍČEK, M. New method for deposition of thixotropic materials with resolution under 100 μm . In *EMPC 2013*. 2013. Grenoble. France, IEEE. 2013. p. 1 - 4. ISBN 978-2-9527467-1-7.
- [28] BURŠÍK, Martin, Michal ŘEZNÍČEK, Jaroslav JANKOVSKÝ a Ivan SZENDIUCH. Nanášecí ústrojí dispensního přístroje pro selektivní nanášení viskózních materiálů [patent]. B 05 C 5/00. 24.11.2010. Česká republika. PV, 303451. Uděleno 08.08.2012. Zapsáno 19.09.2012. Dostupné z: <http://isdv.upv.cz/portal/pls/portal/portlets.pta.detail>

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Průběh nanášení pasty pomocí sítotisku, detail - těrka tiskne pastu skrz síto ..	13
Obr. 2.2 Hydraulické podmínky pro dispensi	17
Obr. 3.1 Přizpůsobený akustický transformátor ze zařízení pro wire-bonding	21
Obr. 3.2 Naměřená rezonanční charakteristika akustického transformátoru	22
Obr. 3.3 Dávkovací robot Fisnar F4200N, model pro konstrukci doplňků	24
Obr. 3.4 Fixační stolky pro Fisnar F4200N	25
Obr. 3.5 Rozvodná skříň (vlevo), spínací skříň (vpravo)	25
Obr. 3.6 Digitální dávkovač stlačeného vzduchu Fisnar SL 101-220 [11]	26
Obr. 3.7 Duralový fixační stolek	26
Obr. 3.8 Srovnání dispense s využitím ultrazvukové přídavné energie a standardního procesu	27
Obr. 3.9 Mechanická odezva UZD na budicí signál	29
Obr. 3.10 Simulace toku dávkovaného média skrze transportní kapiláru o průměru 30, 50 a 100 μm	31
Obr. 3.11 Parametry vyplývající z konstrukce systému a vlastností dávkovaného média (průměr, viskozita)	32
Obr. 3.12 Jednotlivé fáze výtlaku pasty, adhesní podmínka.	33
Obr. 3.13 Redukce průměru kapiláry, vliv na adhesní podmínku	34
Obr. 3.14 Sestava UZD1	35
Obr. 3.15 Návrh modelu UZD1	36
Obr. 3.16 Znázornění nárůstu hodnoty relativní výchylky se vzrůstající vzdáleností od UZLU / UZD1	36
Obr. 3.17 Návrh modelu UZD2	38
Obr. 3.18 Realizace UZD2, detail připojení signálu	38
Obr. 3.19 Rozložená přenosová část mechanických kmitů	39
Obr. 3.20 Znázornění nárůstu hodnoty relativní výchylky se vzrůstající vzdáleností od UZLU / UZD2	39
Obr. 3.21 Můstkové zapojení se zdvojovačem napětí [21]	40
Obr. 3.22 Průběhy signálu zdvojovače napětí s OPA 445	40
Obr. 3.23 Měření výstupního signálu zesilovače – fázový posuv	41
Obr. 3.24 Sestava UZD3, fáze 1 - základní sestava, Model / Funkční vzorek	42
Obr. 3.25 Sestava UZD3, fáze 2 - transformátor mechanických kmitů, Model / Funkční vzorek	43
Obr. 3.26 Sestava UZD3, fáze 3 - Pouzdro, Model / Funkční vzorek	43
Obr. 3.27 Sestava UZD3, fáze 4 - Piezokeramické rezonátory, Model / Funkční vzorek	44
Obr. 3.28 Kompletní sestava UZD3, Model / Funkční vzorek	45
Obr. 3.29 Kompletace sestavy UZD3	46
Obr. 3.30 Výsledná realizace modelu UZD3	46
Obr. 3.31 Vliv vypnutí buzení ultrazvukové hlavice na tisk pasty	48
Obr. 3.32 Vliv sepnutí buzení ultrazvukové hlavice na tisk pasty	48
Obr. 3.33 Snímky povrchu keramických substrátů Al_2O_3 pořízené elektronovým mikroskopem. (www.ceramtec.cz)	49
Obr. 3.34 Výsledky měření povrchové nerovnosti keramického substrátu	49
Obr. 3.35 3D mapa povrchu keramického substrátu	50
Obr. 3.36 Způsob měření nerovnosti povrchu keramického substrátu během tisku	50
Obr. 3.37 Měření rovinnosti povrchu před a po softwarové kalibraci osy Z	51
Obr. 3.38 Struktura tištěného motivu a pravidelnost jeho šířky	52

Obr. 3.39 Změna viskozity mezní vrstvy pasty v závislosti na přídavné UZ energii	53
Obr. 3.40 Provedení rohů bez optimalizace trajektorie (varianta A).....	53
Obr. 3.41 Optimalizace tisku rohů (zelený bod – aktivace dispense, červený bod deaktivace dispense)	54
Obr. 3.42 Jednotlivé provedení UZD1, UZD2, UZD3	55
Obr. 3.43 Konstrukce modelu UZD3.....	56
Obr. 3.44 Tok dávkovaného materiálu transportní kapilárou	58
Obr. 3.45 Vyústění transportní kapiláry	58
Obr. 3.46 Reálné provedení kapiláry s vnitřním průměrem 250 μm (vlevo) a 42 μm - kapilára wire-bonding (vpravo)	59
Obr. 3.47 Nafocené vzorky: vlevo síťotisk Heraeus C5810 L03-02, rozlišení 75 μm , ..	59
Obr. 3.48 Detaily tisku.....	60
Obr. 3.49 Dispensní systém – diagram	61
Obr. 3.50 Tisk čar s mezerami 200/100/75 μm , rychlost 1,5 mm/s, šířka čáry 75 μm , minimální mezera 25 μm	62
Obr. 3.51 Tisk cívek, (vpravo šířka čáry 125 μm , rozteč středů čar 350 μm).....	62
Obr. 3.52 Testovací motivy	63
Obr. 3.53 Detail startovací sekvence	63
Obr. 3.54 Úpravy dispensního robota Fisnar F4200N (kapitola 3.2)	64
Obr. 3.55 Jednotlivé provedení fixačních stolků (kapitola 3.2).....	65
Obr. 3.56 Návrh provedení UZD jednotky, simulace, tisk (kapitoly 3.3, 3.4, 3.5)	65
Obr. 3.57 Provedení UZD1, UZD2, UZD3 (kapitoly 3.6, 3.7, 3.8, 3.12).....	66
Obr. 3.58 Korekční jednotka osy Z, subrutiny pro tisk rohů (kapitoly 3.10, 3.11)	66
Obr. 3.59 Ukázka tisku s rozlišením 75 μm	66

Seznam tabulek

Tabulka 1 Zvolené parametry dispensního tisku	16
Tabulka 2 Rezonanční frekvence s hodnotami úbytku napětí na sériovém napětí	21
Tabulka 3 Parametry piezokeramických měničů Noliac Ceramics NCE80, $\varnothing_o=20\text{mm}$, $\varnothing_i=10\text{mm}$, $t=4\text{mm}$ [18]	22
Tabulka 4 Označení součástí UZD3	45
Tabulka 5 Srovnání jednotlivých provedení UZD	55
Tabulka 6 Parametry vyrobených fixačních stolků	65

Curriculum Vitae

Name: Martin BURŠÍK

Born: February 18th 1984 in Zlín

Contact: bursik@feec.vutbr.cz

Education

- 2003 – 06 **Brno University of Technology / Department of Microelectronics**
Bachelor study of Microelectronics and Technology
State exam passed in June 2006
Bachelor thesis *Plotting quality in small batch electrotechnic production*
- 2006 – 08 **Brno University of Technology / Department of Microelectronics**
Master study of Microelectronice
State exam passed in June 2008
Diploma thesis *Effectivity of cleaning methods in electronics and classification inc. ecology*
- 2008 – 12 **Brno University of Technology / Department of Microelectronics**
Ph.D. study of Microelectronics and Technology
State exam passed in June 2010

Experience

- x/05 – x/06 **VEMER ČESKÁ s.r.o.**
study stay
- 7/06 – **PBT Rožnov p.R., s.r.o.**
analysis and design of equipment for precision cleaning in microelectronics
- 8/08 – **BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Department of Microelectronics**
Wire bonding technology, dispensing system, hybrid integration technology,
- 8/12 – **CEITEC - Core facility Nanofabrication and Nanocharacterization**

Languages

English

Other activities

Consulting and advisories in the area of soldering, software and programming.